



UNIVERSIDAD DE LA RIOJA

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS

Título

Aerodinámica de Aerogenerador de eje Horizontal de 500 kW

Autor/es

MARCO PÉREZ WARMERDAM

Director/es

JOSÉ ANTONIO GÓMEZ CRISTÓBAL

Facultad

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Titulación

Grado en Ingeniería Mecánica

Departamento

INGENIERÍA MECÁNICA

Curso académico

2017-18



Aerodinámica de Aerogenerador de eje Horizontal de 500 kW, de MARCO
PÉREZ WARMERDAM

(publicada por la Universidad de La Rioja) se difunde bajo una Licencia Creative
Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Unported.
Permisos que vayan más allá de lo cubierto por esta licencia pueden solicitarse a los
titulares del copyright.



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Mecánica

CURSO: 2017/2018

CONVOCATORIA: MARZO

TÍTULO:

**AERODINÁMICA DE UN AEROGENERADOR DE EJE
HORIZONTAL DE 500 KW**

AUTOR: MARCO PÉREZ WARMERDAM

DIRECTOR/ES: JOSÉ ANTONIO GÓMEZ CRISTÓBAL

DEPARTAMENTO: Ingeniería Mecánica



MEMORIA

Aerodinámica de Aerogenerador de eje Horizontal de 500 kW



2017-2018
UNIVERSIDAD DE LA RIOJA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



RESUMEN

Un aerogenerador es un dispositivo que transforma la energía del viento en energía eléctrica, a través de diversos sistemas mecánicos cuyo fin es el de mover un generador eléctrico. Actualmente existen diferentes tipos y se clasifican según su eje de rotación en horizontales (HAWT) y verticales (VAWT). En el presente estudio se diseñará la aerodinámica de un rotor de eje horizontal y 50 metros de diámetro, el cual tendrá una potencia nominal de 500 kW.

Previamente al diseño del rotor, se estudiarán las características del viento para un posible futuro emplazamiento. Se tomarán datos durante los cinco últimos años, a través de una estación meteorológica cercana, para obtener un *año tipo*.

Se hará además un estudio matemático de dichos datos para establecer las mejores condiciones de funcionamiento de la aeroturbina, como velocidades de funcionamiento, disposición de los perfiles que forman las palas, etc.

La potencia en el aerogenerador es producida gracias a una adecuada disposición de perfiles aerodinámicos, los cuales son capaces de generar una fuerza de sustentación al circular el viento alrededor de ellos. Dichos perfiles serán facilitados por el NREL y con ellos se propondrán varias alternativas de diseño.

El rango de funcionamiento de la turbina oscilará entre velocidades del viento de 3 y 20 m/s, siendo 10 m/s el valor al cual se alcanza la potencia nominal y si se alojase en el emplazamiento propuesto se obtendría una producción capaz de satisfacer la demanda eléctrica media de 430 hogares.



SUMMARY

A wind turbine is a device which converts the energy of the wind into electricity, by different mechanical systems whose target is moving an electrical generator. Nowadays there are two types, the Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). In this project a wind turbine of 50 meters of diameter will be designed, which also will have a power of 500 kW.

Firstly the characteristics of the wind, in the study zone, will be analyzed. It will be necessary to obtain the wind data from the latest five years. This data had been downloaded from a near weather station, in order to calculate a representative year.

In addition a mathematical research of this data will be made, with the purpose of acquire the best operating conditions, such as nominal speed, the airfoils that will be necessary, etc.

The power of the turbine is produced by an adequate sequence of the airfoils, which are capable of generate a lift force while the wind is crossing it. The airfoil shapes will be given by NREL and after that, different choices will be designed.

The operating range of the wind turbine is between 3 m/s and 20 m/s, and the nominal power is achieved at 10 m/s. Furthermore if the turbine will be allocated in the studied zone, the annual energy production will supply the demand of 430 of homes.

GLOSARIO

$\langle v \rangle$ = Velocidad media anual
 $\langle v' \rangle$ = Velocidad media anual a la altura z'
 $\langle v_z \rangle$ = Velocidad media anual a 13,2 m
 A = Área
 a = Coeficiente de velocidad inducida axial
 a' = Coeficiente de velocidad inducida angular
 BA = Borde de ataque
 BS = Borde de salida
 C = Cuerda del perfil
 c = Factor de escala de la distribución de Weibull
 c' = Factor de escala de la distribución de Weibull a la altura del buje
 C_D = Coeficiente de arrastre
 C_m = Coeficiente de momento
 C_n = Coeficiente de fuerza normal
 C_p = Coeficiente de presión
 C_P = Coeficiente de potencia
 C_T = Coeficiente de empuje
 C_t = Coeficiente de fuerza tangencial
 D = Dimensión característica del número de Reynolds
 E_c = Energía cinética
 F = Fuerza de empuje
 F_D = Fuerza de arrastre
 F_l = Fuerza de sustentación
 F_n = Fuerza normal
 F_t = Fuerza tangencial
 G = Gasto másico
 I_t = Intensidad de turbulencia
 k = Factor de forma de la distribución de Weibull
 k' = Factor de forma de la distribución de Weibull a la altura del buje
 N = número de palas
 $p(v)$ = distribución de probabilidad de Weibull
 p = Presión
 P = Potencia de la aeroturbina
 Pv = Potencia del viento
 Q = Par aerodinámico
 r = Coordenada radial
 Re = Número adimensional de Reynolds
 t = Temperatura
 U = Velocidad absoluta
 v = Velocidad del viento



w = Velocidad relativa
 x = Posición radial
 z = Altura de la estación meteorológica
 z' = Altura de la torre
 α = Ángulo de ataque
 ε = Eficiencia aerodinámica
 θ = Ángulo de calado
 ϑ = Viscosidad cinemática
 λ = Velocidad específica en punta de pala
 λ_r = Velocidad específica local
 ρ = Densidad del aire
 σ = Solidez
 σ_I = Desviación típica
 φ = Ángulo de paso
 ω = Velocidad tangencial de aire
 Λ = Parámetro de carga



ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Aspectos generales.....	9
1.2	Historia y situación actual.....	9
1.3	Tipos de aerogeneradores	12
2	EL VIENTO COMO RECURSO EÓLICO	14
2.1	El viento y su origen	14
2.2	Toma de medidas	14
2.2.1	Medida de la velocidad.....	14
2.2.2	Medida de la dirección	15
2.2.3	Temperatura y densidad del aire.....	16
2.2.4	Variaciones	17
2.3	Tratamiento de los datos eólicos.....	17
2.4	Ley de Weibull.....	18
2.5	Variación de las características del viento con la altura	19
2.5.1	Variación de la velocidad media con la altura.....	19
2.5.2	Variación de los parámetros de Weibull con la altura.....	20
2.6	Potencial eólico.....	21
3	COMPONENTES DE LA TURBINA	24
3.1	Torre de sustentación	24
3.2	Sistema de orientación del rotor	25
3.3	Góndola.....	25
3.4	Rotor	25
3.4.1	Palas.....	26
3.4.2	Buje.....	27
3.5	Freno	28
3.6	Multiplicador	28
3.7	Generador eléctrico.....	29
4	AERODINÁMICA DEL ROTOR	31
4.1	Captación de la energía cinética del viento	31
4.2	Perfiles aerodinámicos.....	32
4.3	Teoría de la cantidad de movimiento (Disco actuador).....	33



4.4	Teoría del momento cinético (Disco actuador con estela giratoria)	36
4.5	Teoría del Elemento de Pala	38
4.6	Combinación de la TEP y la TCM.....	42
4.7	Diseño del rotor	43
4.8	Diseño de las palas.....	46
4.9	Análisis computacional.....	52
4.9.1	Perfiles.....	53
4.9.2	Rotor	56
5	ACTUACIÓN DE LA AEROTURBINA	61
5.1	Rangos de funcionamiento.....	61
5.2	Parámetros característicos.....	61
5.2.1	Coeficiente de potencia	61
5.2.2	Coeficiente de par.....	61
5.3	Fuerzas producidas	62
5.4	Curva de potencia	62
5.5	Producción energética.....	63
6	REFERENCIAS	65
6.1	Bibliografía	65
6.2	Enlaces	65
6.3	Software	66



INDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Ilustración 1: Molinos persas.....	10
Ilustración 2: Potencia instalada en el mundo	11
Ilustración 3: Aeroturbina Darrieus.....	12
Ilustración 4: Aeroturbina tripala	12
Ilustración 5: Aerogenerador Savonius.....	13
Ilustración 6: Aerobomba.....	13
Ilustración 7: Estación meteorológica de Moreda	15
Tabla 1: Direcciones de viento	16
Ilustración 8: Rosa de los vientos	16
Tabla 2: Frecuencia de velocidades.....	18
Ilustración 9: Histograma de velocidades.....	18
Ilustración 10: Distribución de velocidades de Weibull.....	19
Ilustración 11: Nueva distribución de velocidades.....	21
Ilustración 12: Curva de densidad de potencia.....	22
Ilustración 13: Interior de una torre tubular.....	22
Ilustración 14: Torre de celosía	24
Ilustración 15: Rotor diseñado.....	28
Ilustración 16: Sistema de transformación	30
Ilustración 17: Fuerzas en perfil aerodinámico	31
Ilustración 18: Perfil aerodinámico	32
Ilustración 19: Disco actuador	33
Ilustración 20: Volumen de control	34
Ilustración 21: Secciones del volumen de control	37
Ilustración 22: Elemento diferencial de pala	40
Ilustración 23: Triángulo de velocidades.....	41
Tabla3: Ángulo de paso y TSR.....	45
Ilustración 24: Twist o alabeo de la pala	46
Tabla4: Recomendaciones NREL	47
Ilustración 25: Perfiles propuestos	48
Ilustración 26: Distribución de cuerda.....	49
Ilustración 27: Distribución de cuerda - Diseño1	50
Ilustración 28: Distribución de cuerda – Diseño2	50



MEMORIA

Ilustración 29: Distribución de cuerda – Diseño3	51
Ilustración 30: Distribución de cuerda – Diseño4	51
Ilustración 31: Curva diferencial de momento	52
Ilustración 32: Líneas de velocidad S818.....	54
Ilustración 33: Mapa de C_p S818.....	54
Ilustración 34: Líneas de velocidad S830.....	55
Ilustración 35: Mapa de C_p S830.....	55
Ilustración 36: Líneas de velocidad S831	56
Ilustración 37: Mapa de C_p S830.....	56
Ilustración 38: Volumen de control y cuerpo giratorio	57
Ilustración 39: Mallado.....	57
Ilustración 40: Flujo de aire en la turbina.....	58
Ilustración 41: Mapa de presiones a la entrada	59
Ilustración 42: Mapa de presiones a la salida	59
Ilustración 43: Presión en líneas de velocidad.....	60
Tabla 4: Funcionamiento de la aeroturbina	62
Ilustración 44: Curva de potencia.....	63
Tabla 5: Producción anual	64



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

Un aerogenerador es un dispositivo que transforma la energía eólica en energía eléctrica, a través de diversos sistemas mecánicos cuyo fin es el de mover un generador eléctrico.

La energía eólica como tal es la energía cinética que posee el viento y debido a ello, ésta es de carácter renovable.

El aprovechamiento de la energía eólica mediante aerogeneradores supone un gran avance en materia de producción energética debido a grandes ventajas como son:

- Es inagotable ya que el viento debe su existencia al sol.
- Es un recurso global, explotable en todo el mundo.
- Es limpia ya que no existen emisiones asociadas al proceso de generación.
- El terreno circundante es aprovechable y las instalaciones son desmontables tras el final de su vida útil.
- Genera nuevos puestos de trabajo e ingresos a empresarios y propietarios locales.

Si bien es cierto que a pesar de estas ventajas existen desventajas como:

- Produce un importante impacto visual o paisajístico.
- El suministro no es constante ya que depende del viento.
- Puede alterar las rutas migratorias de algunas aves.
- Producen un elevado ruido debido al movimiento de las aspas.
- Puede producir interferencias electromagnéticas.

1.2 Historia y situación actual

La energía eólica fue una de las primeras fuentes de energía que se explotaban en las civilizaciones antiguas, fue en los primeros barcos veleros en el antiguo Egipto.

Los primeros molinos de viento datan del siglo VII a.C. y se localizaron en Sistán, actualmente Afganistán (antigua Persia). Eran molinos de eje vertical con seis u ocho velas de tela y se usaban para moler grano o para bombear agua.



Ilustración 1: Molinos persas

Los molinos de viento de eje horizontal se piensa que aparecieron en Europa en el siglo XII en Francia e Inglaterra.

Tras la invención de la máquina de vapor durante la Revolución Industrial los molinos perdieron sentido, entrando en juego el uso del carbón como forma de energía.

En 1802 Lord Kelvin tuvo la idea de acoplar un generador eléctrico a una máquina que aprovechara el viento.

El inventor Charles F. Brush creó en 1888 la primera turbina eólica para generar electricidad y poco después Poul la Cour puso en marcha la primera máquina diseñada específicamente para generar electricidad a partir de la energía eólica.

En la primera mitad del siglo XX aparecen muchos estudios relevantes, sin embargo, no hubo un interés real por la energía eólica hasta que en los años 70, la crisis del petróleo obligó a investigar sobre nuevas formas de abastecimiento. A finales de esa década aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, que en 1980 llegaron a generar 55 kW.

En 2001 se creó la Asociación Mundial de Energía Eólica (World Wind Energy Association), con sede en Bonn (Alemania). Cuenta con unos 500 miembros en más de cien países.

En la actualidad se genera energía eólica en más de 80 países; Europa es la región con mayor número de aerogeneradores.

Actualmente el país con una mayor capacidad de energía eólica instalada en el mundo es China, seguido por Estados Unidos y Alemania.

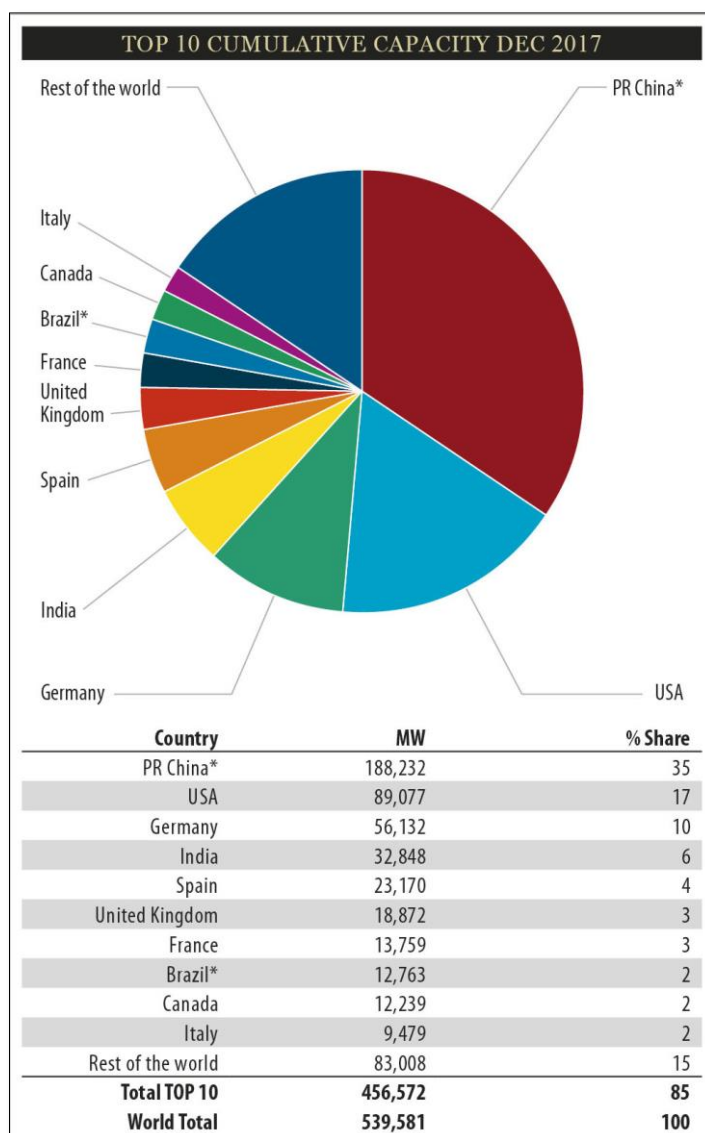


Ilustración 2: Potencia instalada en el mundo
Fuente GWEC

España a pesar de contar con una potencia instalada de 23.170 MW, lo cual le sitúa en el quinto puesto, es el cuarto país que más generadores eólicos fabrica. Esto es debido a que la producción está basada mayormente en la venta al extranjero.

La generación de energía eólica cada vez resulta más rentable debido a tres razones principales.

- Las turbinas de viento cada vez son mayores, con unas torres más altas y una construcción más ligera.
- Ha aumentado la eficiencia en la cadena de suministro y los sistemas de manufactura están reduciendo costes.
- Al mismo tiempo que las instalaciones de eólica aumentan, se ahorran costes al fabricarse a mayor escala de lo que era anteriormente.

1.3 Tipos de aerogeneradores

Los aerogeneradores pueden clasificarse según diferentes criterios.

Por su principio de funcionamiento:

- Mayor aprovechamiento de la fuerza de sustentación:

Tienen una velocidad específica mayor, un par de arranque menor y una mayor producción energética por unidad de área. Se destinan principalmente a la producción eléctrica. De este tipo son los de tipo hélice (Multipala) y los de eje vertical tipo Darrieus.

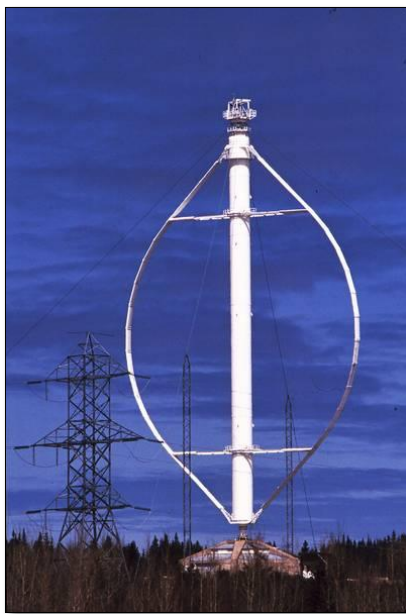


Ilustración 3: Aeroturbina Darrieus
Fuente: www.wind-works.org



Ilustración 4: Aeroturbina tripala
Fuente:

- Mayor aprovechamiento de la fuerza de arrastre:

Tienen una velocidad específica pequeña y un elevado par de arranque. Son los de eje vertical tipo Savonius y los aeromotores utilizados para el bombeo de agua.



Ilustración 5: Aerogenerador Savonius

Fuente: www.kliux.com

Ilustración 6: Aerobomba

Fuente: www.es.wikipedia.org

Por la disposición de su eje de giro:

- Eje horizontal: Su eje de rotación es paralelo a la dirección del viento, es el más común en la producción eléctrica. También llamados HAWT por sus siglas en inglés (*Horizontal Axis Wind Turbine*)
- Eje vertical: su eje de rotación es perpendicular a la dirección del viento. Son menos utilizados, el más conocido es el Savonius y el Darrieus. También llamados VAWT por sus siglas en inglés (*Vertical Axis Wind Turbine*)

Otras clasificaciones pueden realizarse atendiendo a parámetros como son la velocidad de rotación, habiendo rotores de velocidad constante y de velocidad variable, o según el sistema de control de potencia utilizado, como control pasivo o por pérdida aerodinámica (*Stall*) y control activo por variación del ángulo de paso (*Pitch*).

Los generadores de eje horizontal (HAWT) presentan como ventajas más significativas las de tener un mayor coeficiente de potencia (C_P), también que son capaces de barrer un mayor área y de aprovechar el incremento de la velocidad del viento por la mayor elevación respecto al suelo. Además poseen unas características de par y velocidad más adecuadas para el accionamiento de un generador eléctrico que las de eje vertical.

Los de eje vertical tienen las ventajas de ofrecer una simetría vertical y no requieren sistemas de orientación, que tienen mejor accesibilidad y no necesitan de mecanismos de control del ángulo de paso.

2 EL VIENTO COMO RECURSO EÓLICO

2.1 El viento y su origen

El viento es el movimiento horizontal de una masa de aire, provocado por las diferencias de presión en la atmósfera debido a las variaciones de temperatura sobre la superficie terrestre. Las diferentes temperaturas que existen en la tierra y en la atmósfera, provocadas por la distribución no uniforme del calentamiento solar y las distintas características térmicas de las superficies terrestres y oceánicas, producen corrientes de aire. Las masas de aire caliente tienden a subir y las masas de aire frío a quedarse más cerca de la superficie.

2.2 Toma de medidas

Para el presente estudio, se ha tomado como zona de emplazamiento un pueblo de la provincia de Álava, llamado Moreda.

Los datos de velocidad y dirección del viento han sido recogidos por la estación meteorológica allí presente, perteneciente a la agencia vasca de meteorología (Euskalmet).

Estos datos están disponibles en la web de dicha agencia, encontrándose datos desde 2013 hasta la fecha actual.

La localidad de moreda se encuentra a 490 metros de altitud con respecto al mar y el anemómetro y la veleta de la estación está situada 13,2 metros con respecto al suelo.

2.2.1 Medida de la velocidad

La estación realiza las mediciones cada diez minutos, lo cual supone manejar una gran cantidad de datos, así que se han de calcular medias horarias. Esto hace un total de 8.760 datos cada año.

Como mínimo, para realizar un estudio del potencial eólico disponible, se requieren datos de velocidades de viento de 5 años.

El conjunto de los valores históricos de varios años, se resume en un “*año tipo*” donde los valores horarios de la velocidad, se obtienen como promedio de los valores correspondientes a cada hora de todos esos años.

El año tipo de los 5 últimos años en Moreda presenta una velocidad media de 3,81 m/s.



Ilustración 7: Estación meteorológica de Moreda
Fuente: Euskalmet

2.2.2 Medida de la dirección

Además de la velocidad del viento, también es interesante conocer la dirección del mismo.

Es cierto que los modernos aerogeneradores de eje horizontal cuentan con un sistema de orientación que hace girar al rotor sobre la torre, de forma que siempre se aproveche la velocidad del viento independientemente de su dirección, pero si en un principio el rotor está orientado según la dirección dominante el sistema de control tendrá que hacer menos correcciones.

A continuación se muestra una tabla de frecuencias anuales de dirección y una rosa de los vientos en la que se ha representado dichas frecuencias.

DIRECCIÓN	
	0,00%
NE	0,30%
E	2,41%
SE	9,03%
S	22,15%
SW	36,29%
W	24,37%
NW	5,46%

Tabla 1: Direcciones de viento

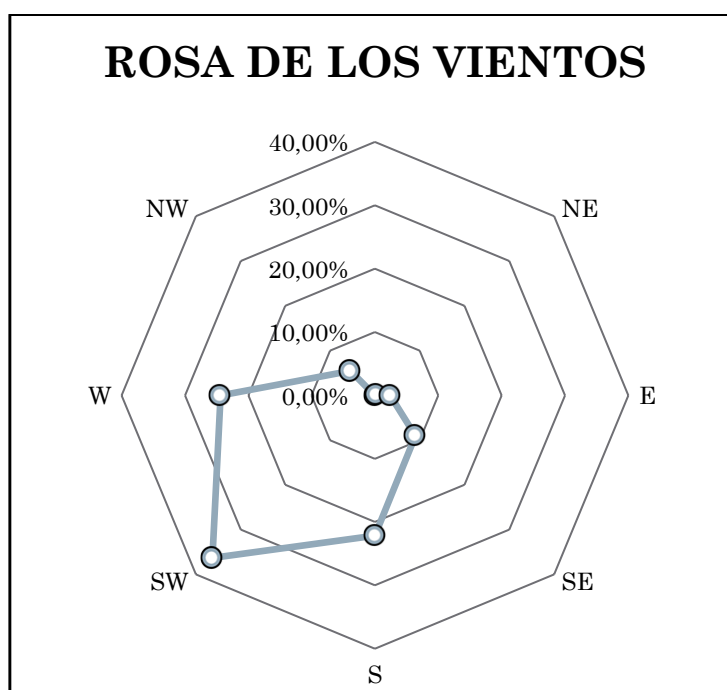


Ilustración 8: Rosa de los vientos

Se puede observar que la componente predominante es la Suroeste, seguida de la componente Este, y es debido a que Moreda se encuentra ubicado al norte del valle del Ebro. El viento dominante de este valle es el Cierzo, el cual sopla según la dirección del cauce del río.

2.2.3 Temperatura y densidad del aire.

La temperatura media anual registrada por la estación meteorológica es de 12,5°C.

Para calcular la densidad del aire en función de su temperatura y la altitud del terreno se emplea la siguiente fórmula.

$$\rho = 1,225 \left(\frac{288}{t + 273} \right) e^{-\left(\frac{h}{8435}\right)} \quad (2.1)$$

Donde t es la temperatura en grados Celsius y h la altitud en metros.



En el caso de estudio la temperatura media es de 12,5°C y la altitud de 490m, por lo que la densidad resulta de unos 1,166 kg/m³ en el punto de medición.

2.2.4 Variaciones

El viento atmosférico no siempre sopla con la misma velocidad, y estos cambios de intensidad pueden ser más o menos violentos. En un periodo de estudio de 5 años, resultaría muy complicado estudiar todas rachas de viento, así que habitualmente se estudia un parámetro llamado intensidad de turbulencia.

La intensidad de turbulencia se mide mediante la siguiente ecuación:

$$I_t = \frac{\sigma_I}{\langle v \rangle} \quad (2.2)$$

Siendo σ_I la desviación típica de los datos recogidos y $\langle v \rangle$ la media aritmética de los mismos.

Para el periodo de estudio, la media aritmética es de 3,81 m/s y la desviación típica toma un valor de 1,18 m/s, por lo que la intensidad de turbulencia toma un valor de 0,31.

Es un valor un tanto elevado ya que supone un 31% de la media. Esto puede repercutir en el diseño a fatiga de los materiales de la pala.

2.3 Tratamiento de los datos eólicos

Una vez recogidos los datos se procede a realizar el estudio estadístico de los mismos.

Para el análisis estadístico de datos eólicos se toman intervalos de velocidades no superiores a 0,5 m/s.

Tras dividir el conjunto de datos en intervalos, se procede a calcular las frecuencias relativas y se grafica el histograma de velocidades.

V(m/s)	Horas	f	F
0<v<0,5	0	0	0
0,5<v<1	4	0,0005	0,0005
1<v<1,5	57	0,0065	0,0069
1,5<v<2	298	0,0339	0,0409
2<v<2,5	707	0,0805	0,1214
2,5<v<3	1252	0,1425	0,2639
3<v<3,5	1487	0,1693	0,4332
3,5<v<4	1527	0,1739	0,6071
4<v<4,5	1194	0,1359	0,7430
4,5<v<5	829	0,0944	0,8374
5<v<5,5	633	0,0721	0,9095
5,5<v<6	394	0,0449	0,9543
6<v<6,5	224	0,0255	0,9798
6,5<v<7	84	0,0096	0,9894
7<v<7,5	50	0,0057	0,9951
7,5<v<8	24	0,0027	0,9978
8<v<8,5	14	0,0016	0,9994
8,5<v<9	5	0,0006	1

Tabla 2: Frecuencia de velocidades

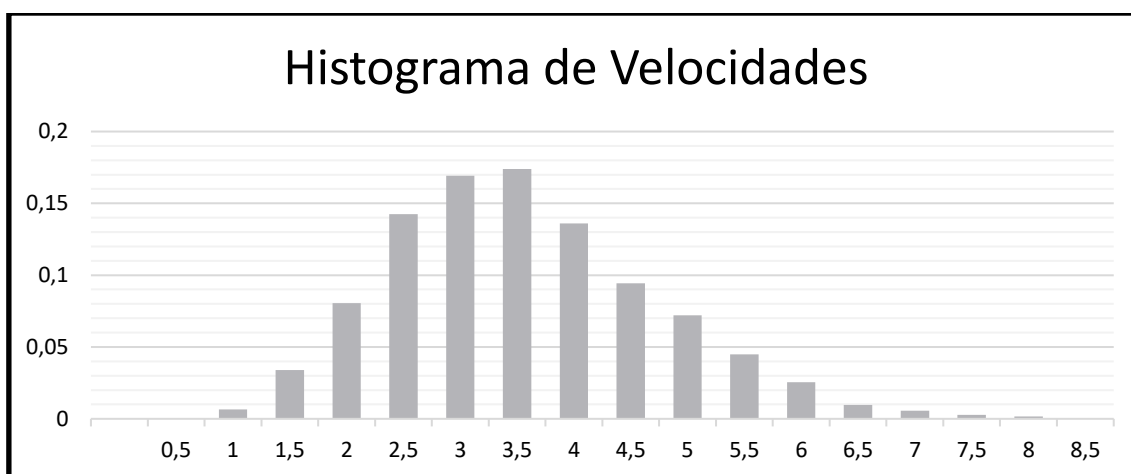


Ilustración 9: Histograma de velocidades

2.4 Ley de Weibull

Como se aprecia en la tabla y en el histograma se dispone de un conjunto discreto de datos.

El conocimiento de la ley de distribución de la velocidad del viento permite calcular su potencial energético y la energía anual que puede producir un aerogenerador.

En la mayoría de los casos de interés energético, la distribución de probabilidad de la velocidad del viento sigue aproximadamente la función de densidad $p(v)$ de probabilidad de Weibull.

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.3)$$

Donde c es el factor de escala (valor próximo a la media) y k es el factor de forma, que caracteriza la simetría de la función.

Para el caso de estudio, $k=3,87$ y $c=4,287$.

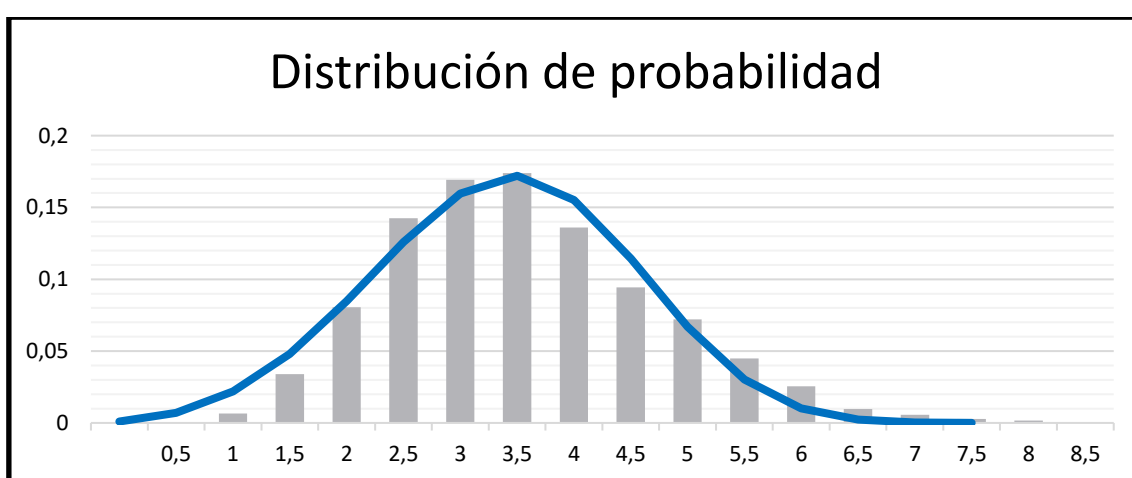


Ilustración 10: Distribución de velocidades de Weibull

En el gráfico se muestra en color azul la distribución de probabilidad que ofrece la ecuación 2.3.

2.5 Variación de las características del viento con la altura

La variación de la velocidad del viento con la altura se debe principalmente a turbulencias de orígenes mecánico y térmico. Las primeras causadas por irregularidades en el terreno y las segundas, por el gradiente vertical de temperatura.

2.5.1 Variación de la velocidad media con la altura

El modelo de cálculo más usado, para estimar la variación de la velocidad media anual con la altura es la ley potencial de Hellman:

$$\frac{\langle v' \rangle}{\langle v \rangle} = \left(\frac{z'}{z} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

Donde α se obtiene mediante la ecuación de Justus-Mikjail, dada por:

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln \langle v_z \rangle}{1 - 0,088 \ln(z/10)} \quad (2.5)$$

$\langle v_z \rangle$ es la velocidad media del viento a la altura de la estación con respecto al suelo, z es la altura de la estación, z' la altura de la torre y $\langle v' \rangle$ la velocidad media del viento a la altura de la torre.

Así para el caso de estudio, se pasa de tener una velocidad media de 3,81 m/s a 13,2 m, a una de 5,87 m/s a 70 m de altura.

2.5.2 Variación de los parámetros de Weibull con la altura

Cuando se conocen los parámetros de la distribución de Weibull para una altura y se desea estimar sus valores para otra altura, Justus-Mikjail desarrollaron unas ecuaciones empíricas, cuyo uso solo es válido para alturas menores a 100 metros.

$$k' = k \left(\frac{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right)}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z'}{10} \right)} \right) \quad (2.6)$$

$$c' = c \left(\frac{z'}{z} \right)^\beta \quad (2.7)$$

$$\beta = \frac{0,37 - 0,088 \ln c}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right)} \quad (2.8)$$

Siendo k y k' los parámetros de forma para las alturas z y z' respectivamente y siendo c y c' los parámetros de escala para las alturas z y z' respectivamente.

La nueva distribución resulta, por tanto, de la siguiente manera.

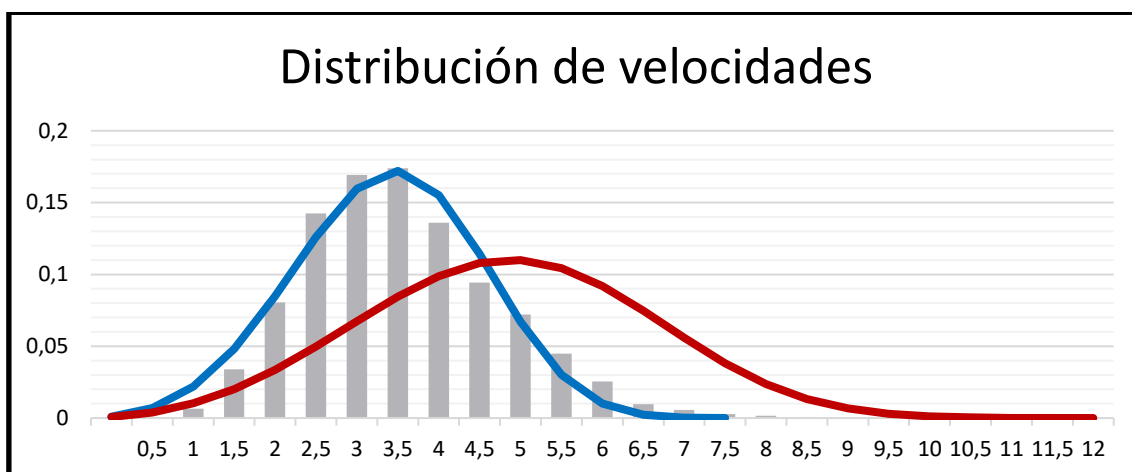


Ilustración 11: Nueva distribución de velocidades

En rojo se muestra el gráfico que sigue la nueva distribución; se aprecia que llega a alcanzar velocidades más altas, las cuales serán capaces de producir una mayor potencia eólica.

2.6 Potencial eólico

El potencial eólico es la máxima potencia extraíble de una corriente de viento, con una determinada velocidad. Así pues es interesante conocer previamente la distribución de velocidades de la zona y la frecuencia de las mismas.

La densidad de potencia del viento para una zona determinada, es una función que indica en que rango de velocidades se extrae la mayor potencia a lo largo de un año.

$$\phi(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot p(v) \quad (2.9)$$

Dónde ρ es la densidad del viento, v la velocidad del viento y $p(v)$ la distribución de velocidades de Weibull.

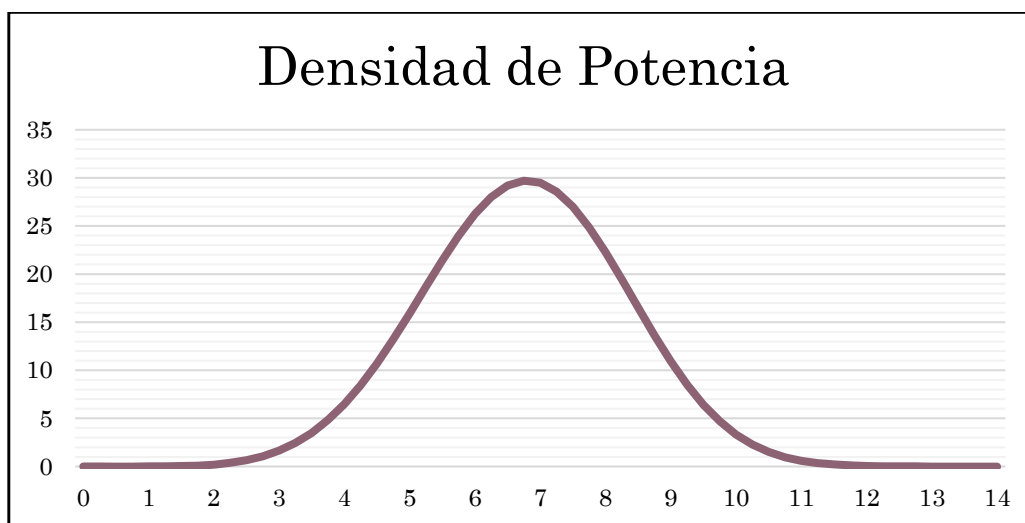


Ilustración 12: Curva de densidad de potencia

Es importante destacar que la zona “útil” se encuentra limitada entre los 3 m/s y los 10 m/s, encontrándose el máximo en torno a 7 m/s.

Por norma general las máquinas eólicas necesitan una velocidad superior a los 3 m/s para que sus palas comiencen a girar, por lo cual la potencia por debajo de este valor no se aprovecha.

Actualmente los aerogeneradores cuentan con un sistema que hace rotar las palas del rotor sobre el eje de las mismas, cambiando la manera en la que el viento incide sobre ellas (*Pitch control*). Con esto se consigue adaptar el rotor a la corriente del viento para extraer la mayor potencia posible en cada caso.

En cuanto al potencial eólico, éste se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.10)$$

Los aerogeneradores, como la mayoría de las máquinas de producción de energía, están limitados por un rendimiento o en este caso por el llamado coeficiente de potencia (C_P).

Por lo tanto la potencia extraíble del viento será:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2.11)$$

Más adelante se demostrará como este coeficiente de potencia no puede ser mayor del 60%, siendo el valor habitual en las turbinas modernas de un 40-50%.

Para poder calcular el potencial eólico hay que decidir previamente cual será la velocidad nominal del rotor.

La curva de potencia de un aerogenerador crece a medida que lo hace la velocidad, hasta que llega a un valor, la velocidad nominal, a partir del cual se mantiene constante hasta la velocidad de corte.



MEMORIA

Para mantener este valor constante el rotor desaprovecha parte la energía que le llega del viento, esto se debe a que si se aprovecha toda la potencia entregada en altas velocidades la aeroturbina se sobrecargaría mucho estructuralmente.

Como se ha indicado anteriormente en la distribución de potencia a partir de 10 m/s la energía anual extraída es muy pequeña, así que este será un buen valor para la velocidad nominal.

Para dicha velocidad el potencial eólico será de $582,08 \text{ W/m}^2$ y la máxima potencia extraíble de 1.144,71 kW.

El diseño propuesto es el de una aeroturbina de 500 kW y un diámetro de rotor de 50 metros, lo cual ya es una máquina de gran tamaño.

Con el valor calculado, para obtener una potencia nominal de 500 kW, el coeficiente de potencia ha de ser de 0,437.

3 COMPONENTES DE LA TURBINA

En el aerogenerador de eje horizontal tipo hélice se distinguen los siguientes subsistemas:

3.1 Torre de sustentación

Es el soporte de la parte móvil del aerogenerador, estando fijada al suelo mediante una cimentación; en su parte superior aloja una cabina llamada góndola.

Las torres de sustentación son torres que alcanzan varias decenas de metros de longitud ya que deben de elevar al rotor a una zona, en la cual los vientos presenten mayores velocidades que en la superficie.

Para aerogeneradores de eje horizontal normalmente se construyen con dos tipos de torre, en celosía y tubulares.

Las primeras requieren de revisiones periódicas de las uniones de los perfiles que forman la estructura, para garantizar su resistencia con el paso del tiempo. Debido a esto no se emplean en torres muy grandes. Poseen un coste menor que las tubulares, pero por contrapartida no son tan seguras para el personal de mantenimiento

Las torres tubulares poseen además de un mejor aspecto estético, un mejor comportamiento dinámico frente a vibraciones y son más seguras para el equipo de mantenimiento. Su coste de fabricación es mayor y son más difíciles de transportar, por lo que en aerogeneradores de pequeña producción no suele merecer la pena.

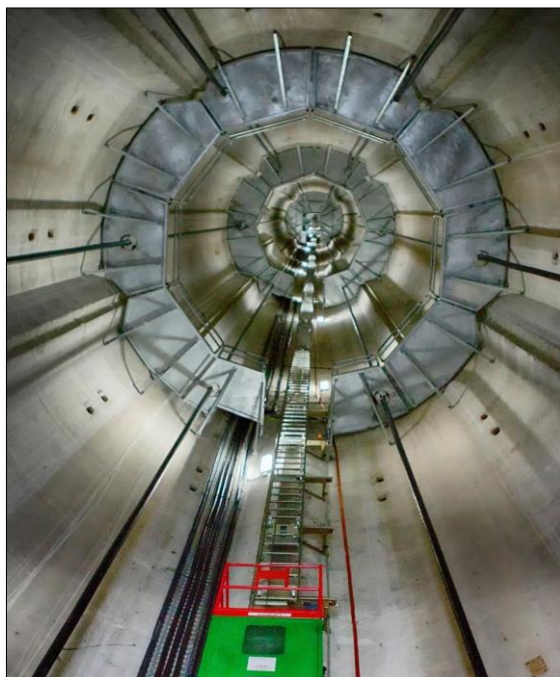


Ilustración 13: Interior de una torre tubular
Fuente: www.erenovable.com



Ilustración 14: Torre de celosía
Fuente: www.quora.com



3.2 Sistema de orientación del rotor

Con el objeto de aprovechar al máximo la energía del viento, el plano de rotación ha de mantenerse siempre perpendicular al vector que describe la velocidad del viento; además el rotor puede situarse de dos formas:

- Delante de la torre: a barlovento o aguas arriba.
- Detrás de la torre: a sotavento o aguas abajo.

Sendos sistemas difieren en que el primero es menos ruidoso pero necesita de un sistema de orientación y el segundo es auto-orientable, pero además del ruido posee el inconveniente de sufrir más oscilaciones en el par motor.

A la hora de orientar la turbina perpendicular al viento existen diversos sistemas además del mencionado rotor a sotavento:

- Veletas de cola: se usan en máquinas pequeñas, formando un conjunto timón-veleta. La orientación se realiza de forma mecánica al incidir el viento sobre el timón-veleta, produciendo un par de fuerzas que alinea el rotor.
- Orientación asistida: es el sistema más utilizado en grandes aerogeneradores; incorpora un sistema de control cuyos sensores son un anemómetro y una veleta, que en función de los valores detectados, actúan un motor que hace rotar la góndola respecto a la torre. También se conoce como mecanismo de control de guiñada (YAW en inglés). Este sistema suele ser lento por lo que las rápidas fluctuaciones de la dirección del viento no son aprovechadas.

3.3 Góndola

La góndola o “*nacelle*” en inglés es la cabina situada en lo alto de la torre donde se ubica el generador eléctrico, la caja multiplicadora y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado.

Está compuesta por una estructura metálica, generalmente de acero y el acceso a ella se hace mediante el interior de la torre.

En la parte posterior de la góndola se sitúa un anemómetro y una veleta que constantemente miden la velocidad y dirección del viento, información que posteriormente proporcionan a los sistemas de control y orientación.

3.4 Rotor

Convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, transmitiéndola al generador por medio de un multiplicador o caja de cambios.



Generalmente los aerogeneradores cuya potencia nominal oscila entre los 500 a 850 kW tienen diámetros de rotor de 35 a 50m. El rotor diseñado tendrá un diámetro de 50 metros debido a que la turbina no se va a ubicar en una zona donde los vientos sean muy fuertes.

A la hora de diseñar rotores se pueden seguir dos estrategias; una es ubicar la turbina en zonas de elevadas velocidades de viento y que el rotor encuentre su potencia nominal a velocidades más elevadas, y otra es ubicar la máquina en una zona con vientos menos fuertes y que la potencia nominal se alcance a velocidades de viento más bajas. La primera opción puede parecer la más atractiva, pero hay que tener en cuenta que para que la aeroturbina funcione de forma óptima a velocidades más elevadas se requieren mejores materiales y diseños más perfeccionados.

En el rotor de una máquina eólica de eje horizontal se distinguen principalmente dos partes:

3.4.1 Palas

El rotor suele ser bipala, o como en el caso de estudio tripala.

- Los rotores bipala son más ligeros, tienen asociado un menor coste y son más fáciles de montar, ahorrando un peso al rotor del orden del 30%.
- Los rotores de tres palas tienen menos vibraciones ya que por su geometría están mejor equilibrados, además producen menor impacto sonoro y una mayor potencia.

Las palas se diseñan en base a una distribución de perfiles aerodinámicos, con el fin de aprovechar la energía cinética del viento de la manera más efectiva posible.

Los materiales de las palas deben reunir las siguientes características:

- Buena resistencia estructural y en particular a la fatiga, originada por cambios bruscos en la velocidad del viento y vibraciones.
- Baja densidad y resistencia a las condiciones climatológicas.
- Fácil fabricación y conformado.

Las aleaciones de acero y aluminio no tienen buenas características de peso y resistencia a la fatiga, solo se emplean en aerogeneradores muy pequeños. Generalmente están construidas con materiales ligeros y resistentes como fibra de vidrio mezclada con resinas epóxicas o fibra de carbono.

Las palas se someten a diversos ensayos entre los que destacan:

- Ensayo estático: la pala se somete a una carga extrema durante un periodo de tiempo, flexionándose en dos direcciones.
- Ensayo dinámico: se somete a oscilaciones de frecuencia igual a la frecuencia natural de la pala. Se realizan un gran número de ciclos de oscilación respecto a



los ejes principales. Las deformaciones se controlan mediante cámaras infrarrojas para detectar microfisuras.

- Ensayo de rotura: ensayo destructivo en el que se aplica una carga tal que provoque la rotura de la pala, para posteriormente analizar la superficie y los fragmentos de la sección de rotura.

Con respecto a la fijación de las palas al buje se puede diseñar de manera que tengan un ángulo de paso fijo y un perfil aerodinámico adecuado, para que cuando la velocidad del viento alcance cierto valor éste comience a entrar en pérdida aerodinámica, lo que constituye el llamado control por “*stall*”.

El rotor diseñado dispondrá de un control del ángulo de paso también llamado “*pitch control*”, que hace que las palas actúen en su mejor punto de funcionamiento hasta alcanzar la velocidad nominal, a partir de la cual se mantendrá constante el régimen de potencia y una vez superada la velocidad límite de diseño, las palas adoptarán una posición de seguridad que las protege.

La velocidad lineal en el extremo de las palas suele estar comprendida en el intervalo de 40 a 85 m/s, limitándose frecuentemente a 70 m/s. Para el caso de estudio, estará limitada a 60 m/s.

3.4.2 Buje

El buje o también llamado cubo es el elemento estructural al cual se unen las palas. A través del mismo la potencia eólica captada por el rotor se transmite a la transmisión.

En rotores tripala, el buje es rígido y está formado por una estructura metálica hueca.

En los aerogeneradores cuyo control de potencia se hace variando el ángulo de calado θ (*pitch control*), se encuentra alojado dentro del buje un sistema hidráulico el cual hace girar las palas variando dicho ángulo según lo requiera el sistema de control.

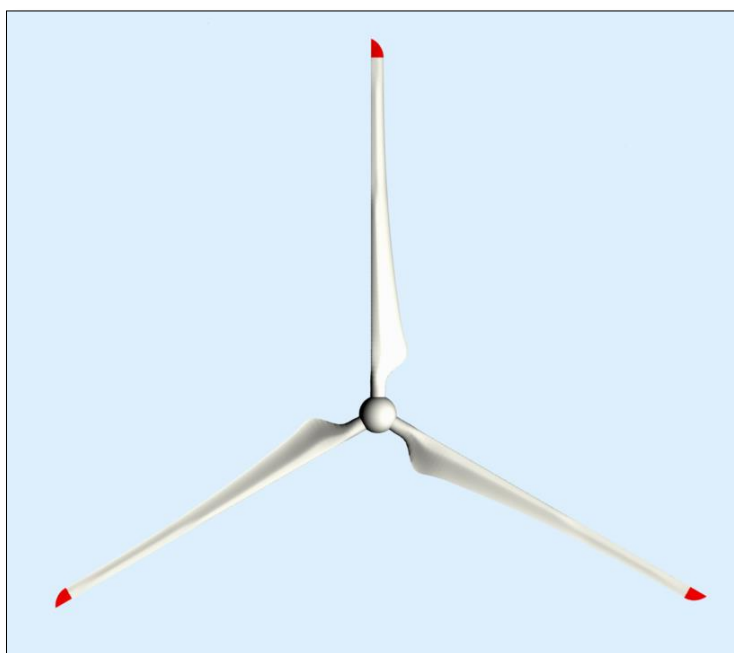


Ilustración 15: Rotor diseñado

3.5 Freno

Actualmente existen dos modos de frenar una turbina de eje horizontal; mediante un freno aerodinámico y mediante un freno mecánico.

El sistema de frenado principal es el aerodinámico que consiste en girar las palas sobre su eje longitudinal, provocando que los perfiles aerodinámicos estén en una posición tal, que no sean capaces de aprovechar la potencia del viento. Esta posición se denomina “*posición en bandera*”.

Está demostrado que estos sistemas son bastante seguros y además, normalmente están accionados por resortes para garantizar el frenado en caso de pérdida de suministro eléctrico o avería del sistema hidráulico.

Como sistema secundario o auxiliar se emplean frenos mecánicos, suelen emplearse como frenos de estacionamiento una vez que las palas se han posicionado en bandera, también son accionados cuando es necesario realizar labores de mantenimiento en la torre.

3.6 Multiplicador

La caja de cambios o caja multiplicadora es la encargada de aumentar la velocidad de giro, proporcionada por el eje del rotor, para mover el generador eléctrico, el cual apenas produciría energía si girase solidario al mismo. Este aumento de la velocidad, es posible gracias a un conjunto de engranajes, que a costa de disminuir el par motor incrementan la velocidad.



En eólicas rápidas (bipala o tripala) usadas para producción de electricidad, en general el generador es una máquina síncrona o asíncrona que gira a un elevado número de revoluciones (1.000-1.500) según el número de polos magnéticos, para generar tensión eléctrica a 50 Hz.

Ese sistema está sometido a grandes esfuerzos de torsión, por lo que es importante seleccionar bien la tecnología. Para turbinas cuya potencia no excede de 500kW se emplean conjuntos de ejes paralelos, para mayores potencias se emplean variadores de ejes planetarios.

El eje de salida es el encargado de accionar el generador y va acompañado de un freno mecánico que se acciona en caso de emergencia.

3.7 Generador eléctrico

La generación eléctrica se realiza por medio del generador eléctrico situado en la góndola. Existen dos tecnologías:

- Generador asíncrono. Se distinguen dos tipos: generador asíncrono con rotor en jaula de ardilla y generador asíncrono con rotor bobinado doblemente excitado.
- Generador síncrono.

La generación eléctrica se hace generalmente en corriente alterna (AC) trifásica y en baja tensión (BT), siendo 690 V la más frecuente.

Para rotores cuya velocidad es variable, se utilizan generadores asíncronos con doble excitación. La frecuencia de la corriente que alimenta el devanado del rotor es variable, lo que permite que las frecuencias eléctricas y mecánica de rotación sean diferentes y que el rotor pueda girar de forma variable.

Debido a que la velocidad del rotor es variable la tensión de salida del generador también lo será, lo que supone un problema a la hora de verter la electricidad producida a la red. Para adecuar la tensión de salida a la tensión de la red, o en su caso de la estación transformadora, se emplean convertidores electrónicos los cuales primero transforman la corriente alterna de salida en corriente continua (CC) a una tensión constante y luego mediante un inversor se transforma de nuevo a corriente alterna a una determinada tensión.

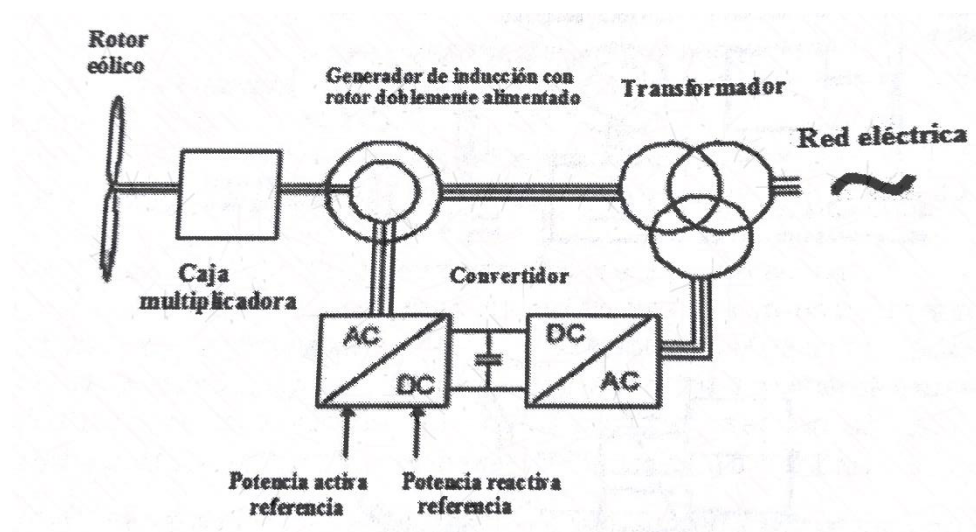


Ilustración 16: Sistema de transformación

Fuente: Ingeniería de la Energía Eólica. Miguel Villarubia

Esta solución es la más empleada ya que su comportamiento respecto a la red eléctrica es bastante bueno, pero tiene el inconveniente de tener un elevado coste económico.

4 AERODINÁMICA DEL ROTOR

4.1 Captación de la energía cinética del viento

Un cuerpo situado en el seno de un fluido en movimiento experimenta dos fuerzas: una en la dirección del movimiento relativo del fluido respecto al objeto, llamada fuerza de arrastre (*Drag*) y otra en la dirección perpendicular a la anterior, llamada fuerza de sustentación (*Lift*); la fuerza total es la suma vectorial de ambas componentes.

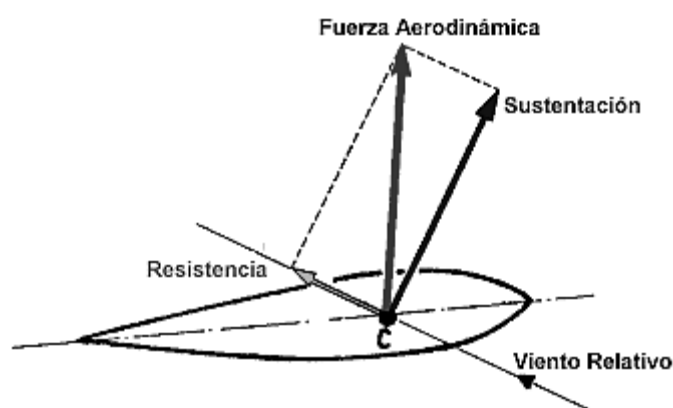


Ilustración 17: Fuerzas en perfil aerodinámico
Fuente: Ingeniería de la energía Eólica. Miguel Villarubia

Los módulos de las fuerzas de arrastre (F_D) y de sustentación (F_L) se expresan según:

$$F_D = C_D \frac{\rho w^2}{2} A ; F_L = C_L \frac{\rho w^2}{2} A \quad (4.1)$$

Dónde C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente, A corresponde al área característica del cuerpo, la proyección del área normal a la dirección del flujo y ρ la densidad del fluido.

w es la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido.

Los coeficientes anteriores dependen de la geometría del cuerpo, del ángulo de ataque y de la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido, a través del número de Reynolds. Estos coeficientes son experimentales.

La fuerza de arrastre tiene mayor importancia que la de sustentación en aquellos cuerpos de geometría no aerodinámica, mientras que en los cuerpos con perfil aerodinámico la fuerza de sustentación tiene mucha mayor importancia.

La conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica para el accionamiento de un generador eléctrico puede realizarse de dos formas:

- Aerogeneradores cuyo par motor se obtiene esencialmente de la fuerza de arrastre, como el aerogenerador de eje vertical tipo Savonius.
- Aerogeneradores cuyo par motor se obtiene esencialmente de la fuerza de sustentación, como el aerogenerador de eje vertical tipo Darrieux y los modernos aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice (tripala o bipala). Sus álabes están compuestos por perfiles aerodinámicos.

4.2 Perfiles aerodinámicos.

Un perfil aerodinámico es aquel perfil en el que se distingue:

- Un borde de ataque enfrentado a la corriente, que debe ser redondeado y de forma lisa y suave.
Esta forma permite al perfil actuar con elevado rendimiento a distintos ángulos de orientación a la corriente.
- Un borde en el extremo a sotavento llamado borde de fuga, que debe ser afilado.
Esta forma tiene por objeto evitar que la corriente le rodee, causando turbulencias o un brusco desprendimiento de la capa límite.
- La cuerda del perfil, que es una línea recta que une el borde de ataque con el de salida.

Las dos líneas que definen la forma del perfil se denominan, extradós la más convexa e intradós la menos convexa, pudiendo llegar a ser cóncava.



Ilustración 18: Perfil aerodinámico
Fuente: www.rabfis15.uco.es

A la hora de estudiar un perfil los parámetros que más se tienen en cuenta son:

- El ángulo de ataque α , es el ángulo formado por la dirección de la velocidad del viento relativo al perfil w y la dirección de la cuerda.
- El espesor máximo, definido por la distancia máxima entre extradós e intradós. Cuanto más grueso es un perfil, mayor resistencia aerodinámica tiene; pero permite una estructura más rígida.
- Los coeficientes de sustentación (C_L) y arrastre (C_D), el primero define la fuerza de empuje que será capaz de ofrecer el perfil y el segundo la resistencia aerodinámica que opone.

El objetivo de un perfil aerodinámico es el de crear una fuerza de sustentación, la cual será aprovechada en este caso para mover el eje de un generador eléctrico.

Este empuje se consigue enfrentando al perfil a una corriente de viento con un determinado ángulo (ángulo de ataque), de tal manera que el aire circule con diferentes velocidades por la superficie del perfil.

Sí en un volumen de control, se aplica la ecuación de Bernoulli se observa que esta diferencia de velocidades origina una diferencia de presiones, la cual a lo largo de la superficie del perfil generará una fuerza ascendente, llamada fuerza de sustentación.

Por el contrario, al hacer circular una corriente de aire por una superficie se produce otra fuerza indeseada, llamada de arrastre.

4.3 Teoría de la cantidad de movimiento (Disco actuador)

Es la idealización de una aeroturbina, desprovista de elementos giratorios, por la que se produce una extracción de la energía cinética del viento, dando lugar a una reducción gradual de la velocidad y a un salto brusco de la presión del viento en su paso por la turbina.

- Las principales hipótesis que contemplamos en esta teoría son:
- Proceso estacionario.
- Flujo incompresible.
- Velocidades uniformes en cada sección del volumen de control.
- Efectos giratorios despreciables.

Aguas arriba de la turbina, la sección de paso es menor que la del disco debido a que posee mayor velocidad y aguas arriba es mayor al poseer menor velocidad (Teorema de conservación de la masa).

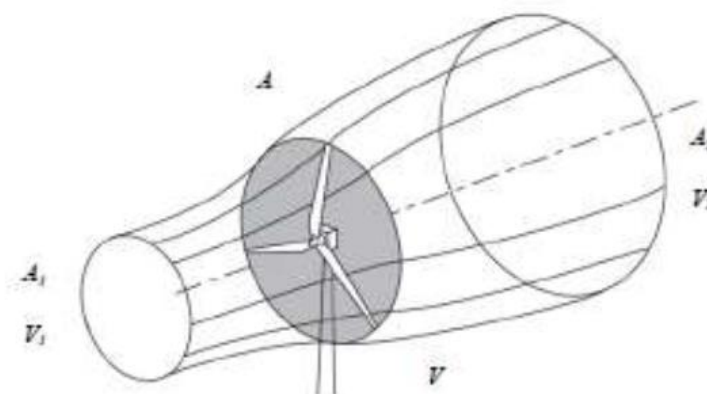


Ilustración 19: Disco actuador

Fuente: Wind Energy Handbook. T. Burton y otros

Para el modelo actual se tiene que:

$$dm = \rho AU dt \quad (4.2)$$

Por tanto la energía cinética extraíble será:

$$dEc = \frac{1}{2} \rho AU^3 dt \quad (4.3)$$

Y la potencia:

$$Pv = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (4.4)$$

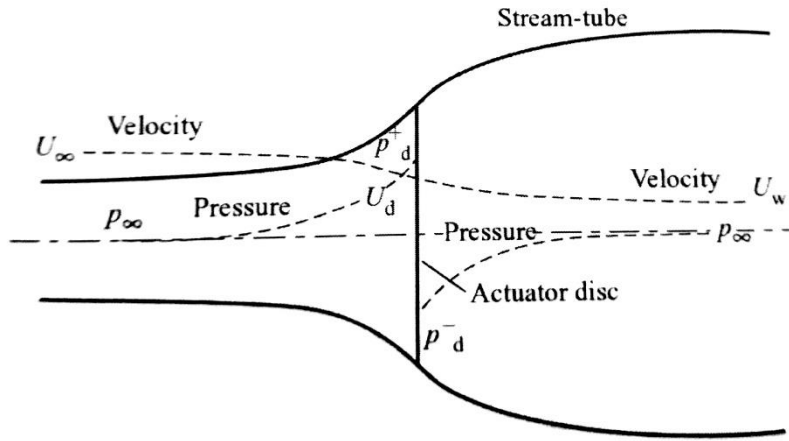


Ilustración 20: Volumen de control

Fuente: Wind Energy Handbook. T. Burton y otros

Se aplica la conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía al volumen de control de la figura 20.

Los subíndices 0 y 3 corresponden a las secciones de entrada y salida del volumen de control así como 1 y 2 corresponden a las secciones inmediatamente anteriores y posteriores a la turbina respectivamente.

En las sección 0, $u_0=U$, $p_0=p_a$; en la sección 3 $p_3=p_a$.

Por conservación de la masa en cada sección, se verifica la igualdad de gasto.

$$G = \rho A_0 u_0 = \rho A_1 u_1 = \rho A_2 u_2 = \rho A_3 u_3 \quad (4.5)$$

Puesto que $A_1=A_2=A=\pi R^2$, se tiene que la componente axial de la velocidad se mantiene constante a su paso por la turbina. $u_1=u_2$.

La fuerza de empuje que ejerce el aire sobre el rotor se obtiene mediante aplicación de la conservación de la cantidad de movimiento entre las secciones 0 y 3.

$$F = (\rho A_0 u_0) u_0 - (\rho A_3 u_3) u_3 = G(u_0 - u_3) \quad (4.6)$$



Tomando signo positivo cuando $u_0 = u_3$; es decir la presencia de la turbina provoca una disminución de la velocidad del aire.

La fuerza ejercida sobre la turbina está causada por una disminución de la presión del aire a través del rotor.

$$F = A(p_1 - p_2) \quad (4.7)$$

Esta diferencia de presiones se obtiene aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones 0-1 y 2-3

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho u_0^2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 \quad (4.8)$$

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 = p_3 + \frac{1}{2}\rho u_3^2 \quad (4.9)$$

Teniendo en cuenta que $p_0 = p_3 = p_a$, se puede expresar la fuerza de empuje como:

$$F = A(p_1 - p_2) = \frac{1}{2}\rho A(u_0^2 - u_3^2) \quad (4.10)$$

Igualando las dos ecuaciones del empuje se obtiene la velocidad u del aire en el plano de giro del rotor de la turbina.

$$u \equiv u_1 = u_2 = \frac{u_0 + u_3}{2} \quad (4.11)$$

Se define el cociente de velocidad inducida axial a como la relación entre la disminución de la velocidad del viento aguas arriba de la turbina y en el rotor de la misma, y la velocidad del viento.

$$a = \frac{u_0 - u_1}{u_0} \quad (4.12)$$

Con lo que las velocidades serán:

$$u = u_1 = u_2 = u_0(1 - a) \quad (4.13)$$

$$u_3 = u_0(1 - 2a) \quad (4.14)$$

Es conveniente expresar la fuerza de empuje de forma adimensional, por medio del coeficiente de empuje C_T .

$$F = \frac{1}{2}\rho A U^2 4a(1 - a) = \frac{C_T}{2}\rho A U^2 \quad (4.15)$$

Con C_T definido como:

$$C_T \equiv \frac{F}{\frac{1}{2}\rho A U^2} = 4a(1 - a) \quad (4.16)$$

Por tanto la potencia suministrada a la turbina será entonces:

$$P = Fu = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 = P_v 4a(1-a)^2 \quad (4.17)$$

Donde P_v es la potencia del viento.

La forma adimensional se consigue introduciendo C_p o coeficiente de potencia. Que indica que fracción de la potencia del viento se extrae por la turbina ideal.

$$C_p \equiv \frac{P}{P_v} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = 4a(1-a)^2 \quad (4.18)$$

Igualando a cero la derivada de la expresión anterior con respecto al coeficiente de velocidad inducida axial, se obtiene el valor de a que hace máxima la potencia extraída por la turbina.

$$a = \frac{1}{3} \rightarrow C_p = \frac{16}{27} \approx 0,5927 \quad (4.19)$$

Este valor corresponde al llamado límite de *Betz*, e indica que, como máximo, en una turbina ideal, el 59,27% de la potencia del viento puede transmitirse al eje de la turbina.

Los diseños más avanzados consiguen $0,45 \leq C_p \leq 0,55$ con palas dotadas de perfiles aerodinámicos muy precisos. No obstante existe una serie de efectos que influyen negativamente en la potencia máxima extraíble por la turbina.

- Estela giratoria
- Número finito de álabes
- Coeficiente aerodinámico de arrastre no nulo
- Pérdidas mecánicas en la transmisión
- Pérdidas eléctricas en el generador

4.4 Teoría del momento cinético (Disco actuador con estela giratoria)

Hasta el momento se ha considerado el rotor como un “*disco actuador*” capaz de extraer energía del viento que lo atraviesa.

Además se suponía que el flujo no experimentaba ninguna rotación a su paso por el disco.

En esta teoría se extiende la anterior para considerar que la energía del viento se extrae por medio de un rotor, que gira a velocidad angular Ω en un eje perpendicular al plano del rotor y paralelo a la dirección del viento.

La reacción al par aerodinámico comunicado al rotor, sobre el fluido, genera un movimiento de rotación del fluido de sentido contrario al giro de las palas. La velocidad

de rotación en la sección 1, y valdrá $\Omega a'$ en la sección 2; por lo tanto, valdrá $\Omega a'$ en el plano de giro del rotor.

La aplicación de las ecuaciones de conservación de momento cinético, cantidad de movimiento y energía a un volumen de control diferencial, formado por una ‘rodaja’ de área $2\pi r dr$ permite obtener el par ejercido entre turbina y fluido, el empuje sobre la máquina y la potencia entregada por esta.

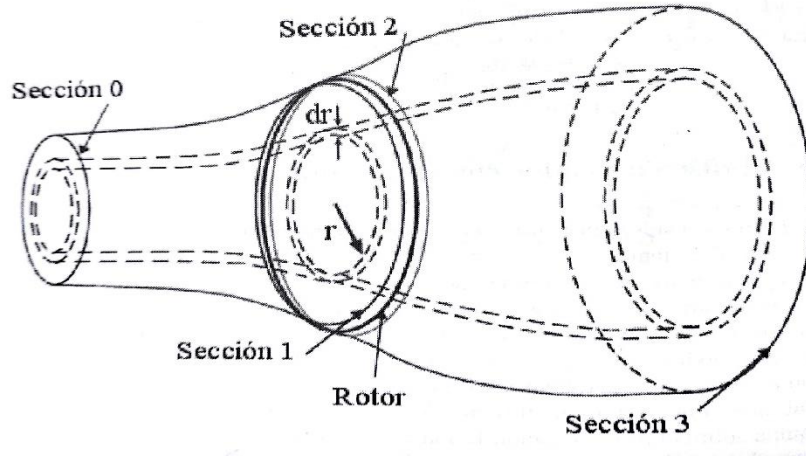


Ilustración 21: Secciones del volumen de control
Fuente: Energía Eólica: Fundamentos y Tecnología. UNED, Madrid

El diferencial de par aerodinámico comunicado al rotor en cada anillo diferencial es:

$$dQ = \dot{m} V_{rotación} r = \rho 2\pi r dr U (1 - a) \Omega 2a' r = 4\pi \rho U (1 - a) \Omega a' r^3 dr \quad (4.20)$$

El coeficiente de velocidad inducida angular corresponde a la relación entre la velocidad tangencial del aire en el plano del rotor, y la velocidad tangencial del rotor.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (4.21)$$

Integrando para todo el rotor, suponiendo a y a' constantes, se obtiene el par aerodinámico:

$$Q = 4\pi \rho U (1 - a) \Omega a' \int_0^R r^3 dr = \rho \pi U (1 - a) \Omega a' R^4 \quad (4.22)$$

La potencia extraída del fluido puede expresarse para cada anillo diferencial:

$$dP = \Omega dQ = 4\pi \rho U (1 - a) \Omega^2 a' r^3 dr \quad (4.23)$$

Igualando la expresión anterior con la de la potencia de la TCM se obtiene una relación entre los factores de velocidad inducida axial y tangencial, a y a' , que se cumple en cada “rodaja” diferencial:

$$U^2 a (1 - a) = \Omega^2 a' r^2 \quad (4.24)$$



Para obtener una expresión adimensional se definen los parámetros velocidad específica punta de pala (*Tip Speed Ratio*), λ , y posición radial, x .

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (4.25)$$

$$x = \frac{r}{R} \quad (4.25)$$

Sustituyendo, se llega a:

$$a(1 - a) = \lambda_r^2 a' x^2 \quad (4.26)$$

Se puede definir el diferencial del coeficiente de potencia para la teoría del momento cinético:

$$dC_P = \frac{dP}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = \frac{4\pi\rho U(1-a)\Omega^2 a' r^3 dr}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 U^3} = 8a'(1-a)\lambda_r^2 x^3 dx \quad (4.27)$$

Se puede demostrar que el máximo valor de C_P para la teoría del momento cinético es el mismo que para la de la cantidad de movimiento, es decir el límite de Betz.

$$C_{P,max} \approx 0,6$$

Optimizar el coeficiente de potencia es de vital importancia a la hora de diseñar un aerogenerador.

4.5 Teoría del Elemento de Pala

Las teorías anteriores permitían expresar la potencia producida por la aeroturbina en función de los parámetros a y a' , sin considerar la forma del rotor ni el tipo de perfil de las palas que constituyen el rotor.

En la teoría del elemento de pala se incluyen los efectos de resistencia o arrastre y de sustentación sobre las palas.

No obstante será necesario añadir correcciones por el número finito de las palas y por pérdidas en la punta de las palas.

Coeficiente de sustentación:

Se define como el coeficiente entre la fuerza de sustentación generada en el cuerpo por el flujo incidente L , y la fuerza del fluido para el área plana A .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (4.28)$$



Para el caso de un perfil bidimensional, se considera la definición de C_L por unidad de ancho, con lo que A se sustituye por la cuerda C .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 C} = 2\pi \sin \alpha \quad (4.29)$$

Coefficiente de resistencia o arrastre:

Se debe a la existencia de viscosidad en el fluido real que se mueve alrededor del perfil, provocando una fuerza en sentido opuesto a la dirección de incidencia; en fluidos ideales $C_D = 0$, y en perfiles aerodinámicos tiene un valor pequeño.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 C} \quad (4.30)$$

Se define el coeficiente $\varepsilon \equiv C_D/C_L$, que es propio de cada perfil, y suele ser inferior a 0,05 en aquellos de cierta *calidad aerodinámica*.

Coefficiente de momento:

Para determinar completamente el sistema de fuerzas que actúa sobre un perfil, es necesario conocer el momento M de las fuerzas respecto a un punto del perfil; el momento se toma positivo cuando hace girar al perfil levantando la parte frontal.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U^2 C^2} \quad (4.31)$$

Dependencia de los coeficientes de sustentación, arrastre y momento.

Esencialmente los coeficientes adimensionales de sustentación, arrastre y momento son función del ángulo de ataque o incidencia α y del número de Reynolds (Re).

El valor de C_L aumenta linealmente con α , con una pendiente teórica de 2π por radián para pequeños valores de α hasta alcanzar el valor máximo. Si el ángulo de incidencia se aumentase aún más, el perfil entraría en pérdida (desprendimiento de la capa límite) y se observa una disminución brusca de C_L . Un valor típico de entrada en pérdida es $\alpha^{cr} = 15^\circ$

El valor de C_D es prácticamente constante, y bajo, mientras el ángulo de ataque sea pequeño, si el perfil entra en pérdida, C_D aumenta rápidamente con α .

La dependencia del número de Reynolds también es significativa, una vez superado cierto valor, (ej. $Re = 4 \cdot 10^5$), la influencia sobre las características del perfil son despreciables.

Fuerzas sobre perfiles aerodinámicos

El objetivo de la teoría del elemento de pala es poder describir los efectos del rotor de la aeroturbina en las fuerzas que actúan sobre cada elemento anular diferencial de radio r y envergadura dr ; de acuerdo a las siguientes hipótesis:

- Independencia radial entre los elementos de pala; cada elemento es responsable únicamente de la variación de cantidad de movimiento de la masa de aire que atraviesa la sección anular barrida por el elemento de pala.
- Fuerza ejercida por la pala sobre el fluido constante en cada elemento anular; el rotor consta de un número infinito de palas.
- Flujo bidimensional alrededor del elemento de pala.
- Flujo axilsimétrico.

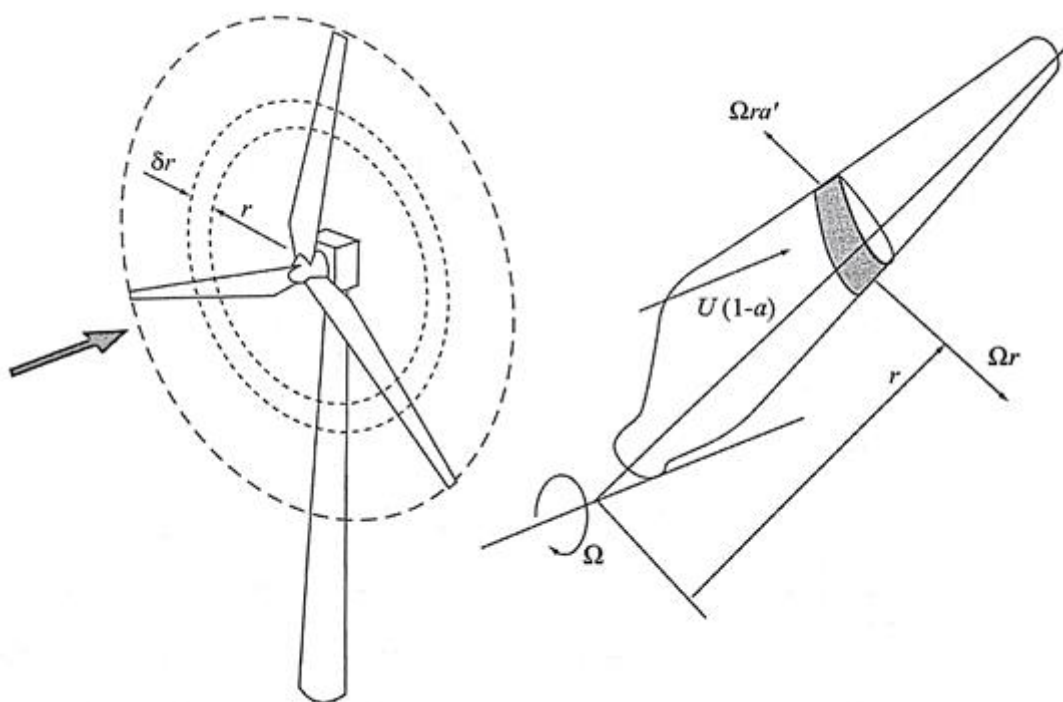


Ilustración 22: Elemento diferencial de pala

Fuente: Wind Energy Handbook. T. Burton y otros

Las fuerzas que actúan sobre la pala podrán expresarse en función de los coeficientes de sustentación y de arrastre.

Conviene destacar los siguientes ángulos característicos de las palas del rotor:

- Ángulo de calado o de paso θ ("pitch"): el que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación.
- Ángulo de ataque o incidencia α : el que forma la velocidad relativa del viento con respecto a la pala, con la cuerda del perfil.
- Ángulo de flujo φ : el que forma la velocidad relativa con el plano de rotación. Se verifica $\varphi = \theta + \alpha$.
- Ángulo de torsión ("twist"): es la diferencia entre los ángulos de calado en una cierta sección r y la sección de punta de pala.

La velocidad relativa w del viento respecto a la pala tiene dos componentes:

- Una axial paralela al eje del rotor, con valor $U(1 - a)$, donde Ua es la velocidad inducida axial en sentido opuesto al del viento; y U es la velocidad del viento aguas arriba del rotor.
- Una tangencial paralela al plano del rotor con valor $\Omega r(1 + a')$, donde $a'\Omega r$ es la velocidad inducida tangencial en sentido opuesto a la velocidad de giro Ω del rotor.

Por lo tanto, la velocidad relativa vale en magnitud.

$$w = \sqrt{U^2(1 - a)^2 + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (4.32)$$

Relaciones geométricas entre las componentes de las fuerzas

En la figura se muestran las componentes de las fuerzas de sustentación L y de arrastre D sobre el elemento de pala de una máquina que gira hacia la derecha a velocidad Ω ; la resultante de estas fuerzas tiene un cierto valor de empuje en la dirección normal del eje de giro, F_n y otra componente tangencial en el plano del rotor en el mismo sentido de giro de la máquina, F_t .

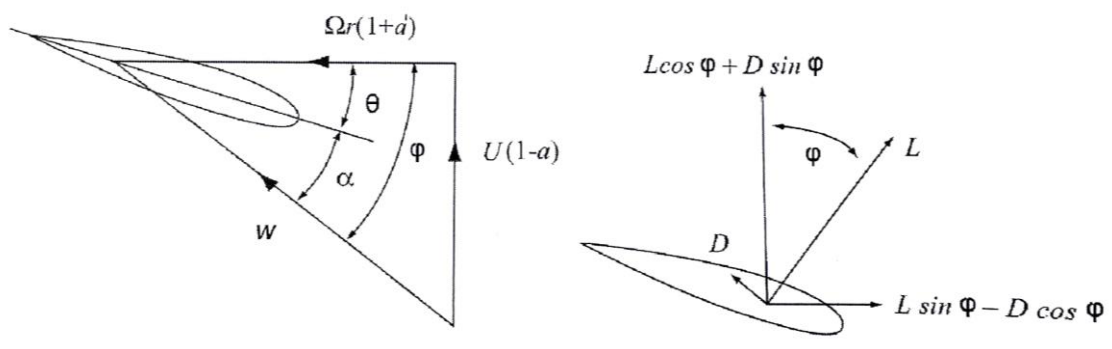


Ilustración 23: Triángulo de velocidades

Del triángulo de velocidades se deduce que:

$$\tan \varphi = \frac{U(1 - a)}{\Omega r(1 + a')} = \frac{(1 - a)}{(1 + a')\lambda} \quad (4.33)$$

$$\sin \varphi = \frac{U(1 - a)}{w} \quad (4.34)$$

$$\cos \varphi = \frac{\Omega r(1 + a')}{w} \quad (4.35)$$

Asimismo para un elemento anular de envergadura dr , se tiene que las componentes de la resultante son:

$$dF_n = (L \cos \varphi + D \sin \varphi) N dr \quad (4.36)$$

$$dF_t = (L \sin \varphi - D \cos \varphi) N dr \quad (4.37)$$

Dónde N es el número de palas del rotor, y las fuerzas de sustentación y arrastre, L y D , respectivamente pueden expresarse en función de sus coeficientes adimensionales $C_L(\alpha)$ y $C_D(\alpha)$, como:

$$L(\alpha) = \frac{1}{2} \rho C w^2 C_L(\alpha) \quad (4.38)$$

$$D(\alpha) = \frac{1}{2} \rho C w^2 C_D(\alpha) \quad (4.39)$$

Con lo que tanto la fuerza de empuje diferencial dF_n , como el par diferencial que ejerce el fluido sobre la pala dM , pueden obtenerse combinando ambas ecuaciones. En el caso del par diferencial, se multiplica la distancia r por el diferencial de fuerza tangencial dF_t en el plano del rotor, finalmente la potencia del rotor puede calcularse como ΩdM .

$$dF_n = \frac{1}{2} \rho w^2 C N (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) dr \quad (4.40)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho w^2 C N (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r dr \quad (4.41)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho w^2 \Omega C N (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) r dr \quad (4.42)$$

Introduciendo la definición de los coeficientes de fuerza normal y tangencial siguientes:

$$C_n \equiv C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (4.43)$$

$$C_t \equiv C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi \quad (4.44)$$

Se pueden escribir las ecuaciones anteriores como:

$$dF_n = \frac{1}{2} \rho w^2 C N C_n dr \quad (4.45)$$

$$dM = \frac{1}{2} \rho w^2 C N C_t r dr \quad (4.46)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho w^2 \Omega C N C_t r dr \quad (4.45)$$

4.6 Combinación de la TEP y la TCM

Las teorías de cantidad de movimiento del disco actuador y la teoría del elemento de pala pueden combinarse para relacionar la forma de la pala con las características de funcionamiento de la máquina y, en particular, con su producción de potencia.



Existe una relación entre los coeficientes de inducción axial y tangencial (a y a' , respectivamente), y las fuerzas que ocurren en las palas de la aeroturbina.

$$\frac{a}{1-a} = \frac{CNC_n}{8\pi r \sin^2 \varphi} \quad (4.46)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{CNC_t}{8\pi r \sin \varphi \cos \varphi} \quad (4.47)$$

Un parámetro importante en el funcionamiento y diseño de las aeroturbinas es el de *solidez* σ , definido como la relación entre el área ocupada por las palas del rotor, y el área barrida:

$$\sigma = \frac{NA_B}{\pi R^2} \quad (4.48)$$

Dónde A_B es el área ocupada por las palas, con cuerda $C(r)$:

$$\sigma(r) = \frac{NC(r)}{2\pi r} \quad (4.49)$$

Si introducimos la solidez en las ecuaciones anteriores:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma C_n}{4 \sin^2 \varphi} \quad (4.50)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma C_t}{4 \sin \varphi \cos \varphi} \quad (4.51)$$

De donde se puede despejar directamente a y a' :

$$a = \left(\frac{4 \sin^2 \varphi}{\sigma C_n} + 1 \right)^{-1} \quad (4.52)$$

$$a' = \left(\frac{4 \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma C_t} - 1 \right)^{-1} \quad (4.53)$$

4.7 Diseño del rotor

Se realizará un primer diseño del rotor de la aeroturbina en condiciones óptimas, teniendo en cuenta la estela giratoria.

Se define el parámetro de carga, el cual será útil posteriormente para realizar los cálculos:

$$\Lambda = \frac{\sigma C_L}{4} \quad (4.54)$$



Combinando la ecuación 4.26, obtenida en la teoría del momento cinético con la 4.33, obtenida del triángulo de velocidades se obtiene la siguiente expresión:

$$\tan \varphi = \frac{a'}{a} \lambda_r \quad (4.55)$$

El siguiente paso es sustituir las ecuaciones 4.52 y 4.53, definidas en la teoría del elemento de pala para a y a' en la expresión anterior:

$$\lambda_r = \frac{\sin \varphi (2 \cos \varphi - 1)}{(1 - \cos \varphi)(2 \cos \varphi + 1)} \quad (4.56)$$

Que aplicando identidades trigonométricas queda de la siguiente manera:

$$\varphi = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{1}{\lambda_r}\right) \quad (4.57)$$

Con esta expresión se puede obtener el flujo óptimo en función de la velocidad específica local, conociendo previamente el valor de λ .

Se pretende ahora obtener la distribución de solidez o cuerda a lo largo de la pala; de nuevo se emplea la ecuación obtenida de la teoría del momento cinético combinada con las expresiones que definen a y a' , esta vez sustituyendo el parámetro Λ en ellas:

$$a = \left(\frac{\sin^2 \varphi}{\Lambda \cos \varphi} + 1 \right)^{-1} \quad (4.58)$$

$$a' = \left(\frac{\cos \varphi}{\Lambda} - 1 \right)^{-1} \quad (4.59)$$

Así se obtiene una ecuación de segundo grado en Λ :

$$\Lambda^2 2 \Lambda \cos \varphi - \sin^2 \varphi = 0 \quad (4.60)$$

Cuya única solución con sentido físico es:

$$\Lambda = 1 - \cos \varphi \quad (4.61)$$

Deshaciendo la relación del parámetro Λ se puede calcular la distribución de cuerda:

$$\sigma C_L = 4(1 - \cos \varphi) \rightarrow C C_L = \frac{8\pi r}{N} (1 - \cos \varphi) \quad (4.62)$$

Una vez son conocidas las ecuaciones que modelaran el funcionamiento, hay que establecer cuáles serán los parámetros iniciales de diseño.

El diseño se realizará en torno al punto óptimo de trabajo, es decir, cuando la velocidad del viento equivale a la velocidad nominal de la aeroturbina.

Lo primero es dimensionar la velocidad específica en punta de pala λ . Se recomienda establecer un valor entre 8 y 10, pero para no tener velocidades lineales demasiado elevadas en la punta se ha establecido en 6.

Una vez conocido el valor de λ en la punta del aerogenerador, se calcula λ_r , para los diferentes tramos de la pala, y con ello el ángulo óptimo de paso φ .

r (m)	λ_r	ϕ_{op} (°)
0	0	0
1,25	0	48,87
2,5	0,60	39,36
3,75	0,9	32,01
5	1,2	26,54
6,25	1,5	22,46
7,5	1,8	19,37
8,75	2,1	16,98
10	2,4	15,08
11,25	2,7	13,55
12,5	3,0	12,29
13,75	3,3	11,24
15	3,6	10,35
16,25	3,9	9,59
17,5	4,2	8,93
18,75	4,5	8,35
20	4,8	7,85
21,25	5,1	7,40
22,5	5,4	6,99
23,75	5,7	6,63
25	6,0	6,31

Tabla 3: Ángulo de paso y TSR

Como se puede observar se ha dividido la pala en tramos de 1,25 metros cada uno.

El ángulo de calado de los perfiles θ ha de disminuir con el radio para obtener un cierto ángulo de ataque α , pues según la ecuación 4.33, la tangente de φ es inversamente proporcional a r . Esto se conoce como “*alabeamiento de la pala*”, lo cual da al perfil la característica torsión que existe en ellas.

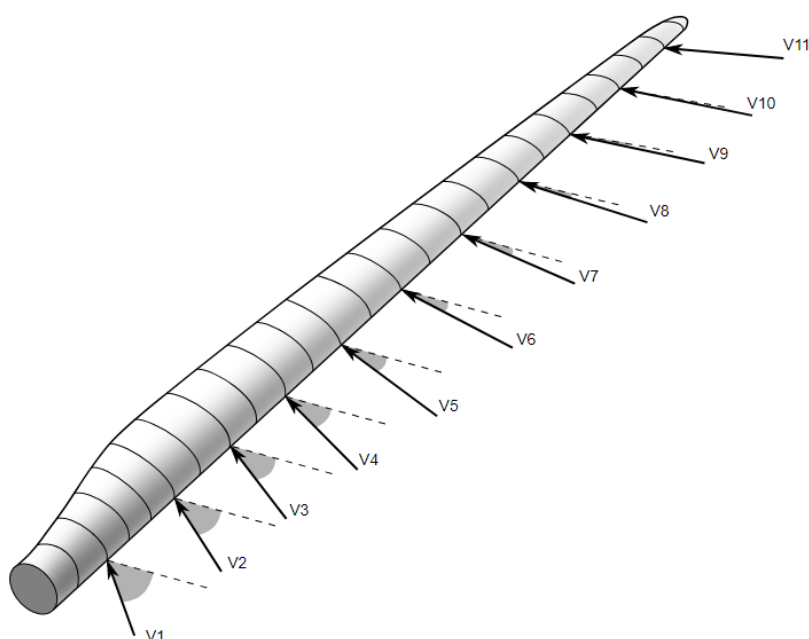


Ilustración 24: Twist o alabeo de la pala

Una vez son conocidos φ y λ se procede a calcular los parámetros restantes.

Hay que observar que la velocidad relativa cambia drásticamente conforme aumenta el radio, esto es debido a que, a pesar de existir una velocidad angular constante la velocidad lineal aumenta a la par que lo hace el radio. Esta velocidad lineal es a su vez sumada vectorialmente con la velocidad incidente del viento (triángulo de velocidades).

4.8 Diseño de las palas

El rotor de la turbina estará formado por 3 palas de 25 m de longitud, aunque se descontará 1,25 m debido al diámetro del buje en el que se alojan.

El perfil de una pala de un aerogenerador de eje horizontal normalmente está definido por tres perfiles aerodinámicos, el perfil de raíz “*root*”, el perfil primario “*primary*” y el perfil de punta “*tip*”.

El perfil raíz se encuentra presente en el primer 50-60% de la pala, el primario entre el 50-60% y el 80-85% y el de pala en último 15-10%.

Los objetivos que se persiguen para determinar los perfiles de la pala son:

- Alta rigidez, ya que son palas de grandes dimensiones sometidas a grandes esfuerzos de flexión.
- Espesores relativos variables: los requisitos difieren desde la punta a la raíz, por tanto, es indispensable dotar a la pala de una variación que proporcione adaptabilidad al buje y resistencia en la raíz.

- Eficiencia aerodinámica máxima. (Valor de $\varepsilon = C_D/C_L$, bajo).
- Coeficiente de sustentación máximo ($C_{L\text{ máx}}$): no debe ser demasiado elevado, debido a que no se quiere obtener un valor de la fuerza axial muy elevada, ya que transmitiría un gran esfuerzo a la torre.
- La pérdida de sustentación aerodinámica en el perfil ha de ser gradual, esto se debe a que una vez que la turbina ha alcanzado su potencia nominal se mantiene dicha potencia, conforme aumenta la velocidad a costa de perder sustentación. Si este fenómeno sucediera de manera brusca, se dañaría sustancialmente la estructura del rotor y de la torre.

El *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), una de las entidades más importantes del mundo en materia de energías renovables, ofrece una serie de perfiles aerodinámicos específicos para máquinas eólicas.

A continuación se muestra una tabla de la familia de perfiles “S” del NREL.

NREL's S-Series Airfoil Families

Rotor Diameter	Category	Root	Primary	Tip
1–3 m	Thick	S835	S833	S834
3–10 m	Thick	S823	-	S822
10–20 m	Thin	S804	S801	S802
	Thin	S804	S801	S803
	Thin	S807	S805	S806
	Thin	S807	S805A	S806A
	Thin	S808	S805A	S806A
	Thick	S821	S819	S820
20–30 m	Thick	S811	S809	S810
	Thick	S814	S812	S813
	Thick	S815	S812	S813
20–40 m	-	S814	S825	S826
	-	S815	S825	S826
	-	-	-	S829
30–50 m	Thick	S818	S816	S817
40–50 m	Thick	S818	S830	S831
	Thick	S818	S830	S832
	Thick	S818	S827	S828

Tabla 4: Recomendaciones NREL

Para un diámetro de rotor de 50 metros, se recomiendan 4 combinaciones de perfiles:

- La primera opción estudiada será S818-S816-S817.
- La segunda S818-S827-S828.
- La tercera S818-S830-S831.
- La cuarta S818-S830-S832.

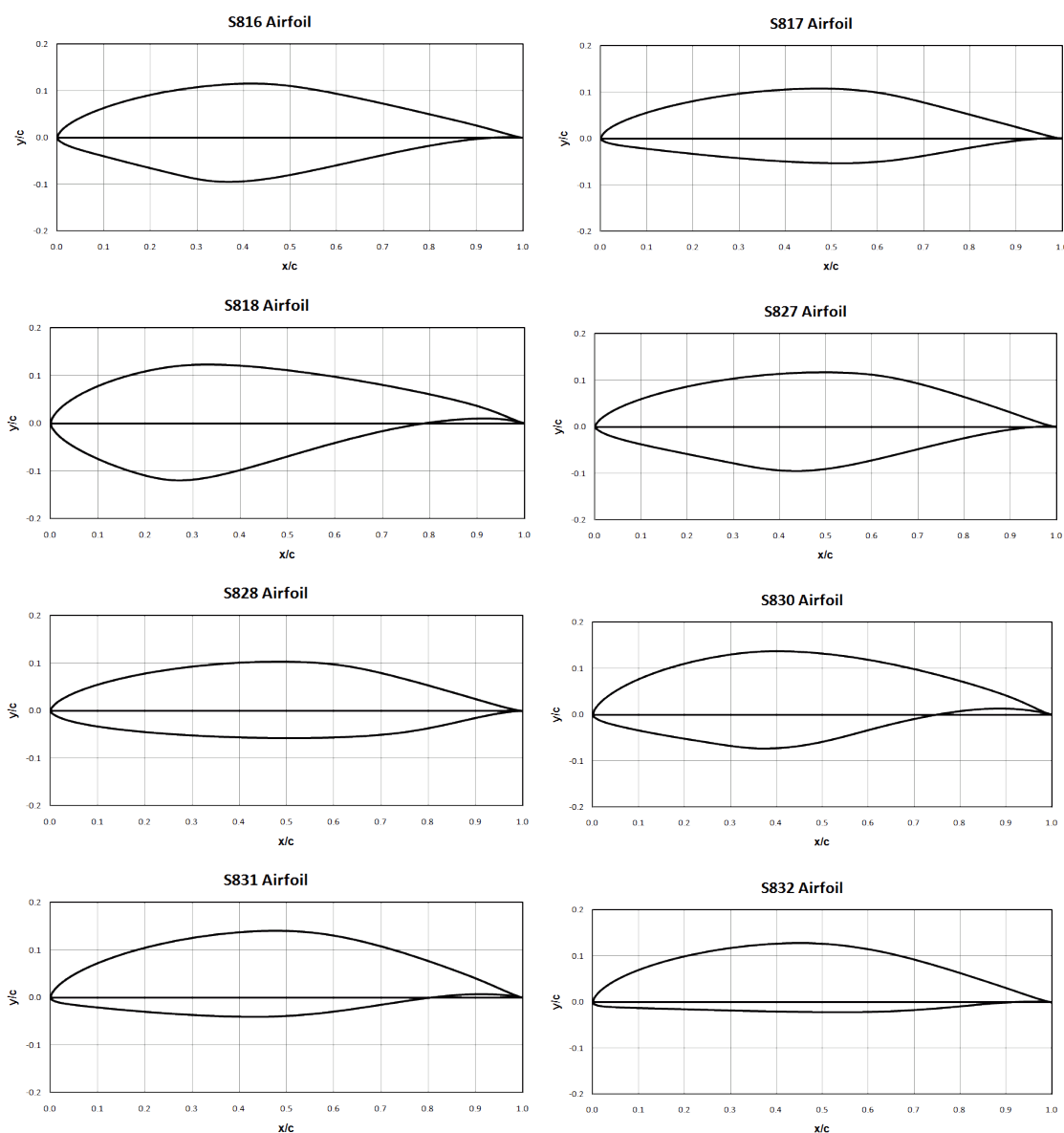


Ilustración 25: Perfiles propuestos

Los espesores de perfil en todas las opciones siguen una variación de 24% - 21% - 16% de la cuerda, lo que hace que la reducción de espesor sea gradual.

Una vez conocidos los perfiles a emplear para las cuatro opciones de diseño, se procede a realizar los cálculos.

Lo primero que hay que tener en cuenta es que los perfiles aerodinámicos no se comportan igual en todas las condiciones sino que los coeficientes de sustentación, arrastre y momento varían en función del número de Reynolds.

Este número adimensional se define mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{wD}{\vartheta} \quad (4.63)$$

Dónde w es la velocidad relativa del aire con respecto al perfil, D corresponde a la longitud característica, en este caso la cuerda que define el perfil y ϑ es la viscosidad cinemática del fluido.

Gracias al software de diseño de perfiles *JavaFoil*, se puede conocer el comportamiento de los diferentes perfiles para distintos números de Reynolds.

Primero se hace una estimación del rango en el que se va a encontrar este número, para después calcular un promedio del coeficiente de sustentación a lo largo de la pala.

Con dicho promedio se resuelve la ecuación 4.62 y se obtiene el valor de la cuerda c en función del ángulo de paso φ , pudiendo obtenerse una tabla con la distribución de cuerda de cada pala.

Este proceso conlleva realizar varias iteraciones, ya que es imposible determinar exactamente el número de Reynolds sin conocer previamente la distribución de cuerda. El número de iteraciones vendrá determinado por el error que se está dispuesto a asumir.

El error relativo máximo asumido es de un 1,58% para los cálculos correspondientes al perfil S818. En el resto de perfiles no se superó el 0,6%.

Como cada perfil posee un coeficiente C_L distinto, según la ecuación 4.62, en las transiciones entre perfiles se producirá un salto brusco en las distribuciones de cuerda, es por ello por lo que se ajusta la curva que define dichas distribuciones, mediante una curva polinómica, para obtener una ecuación continua y suave que defina la cuerda de la pala.

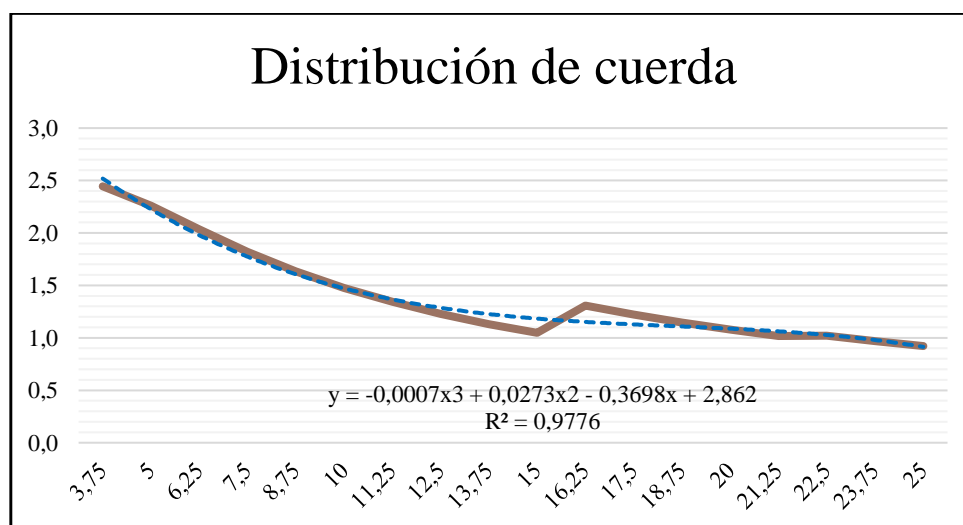


Ilustración 26: Distribución de cuerda

La gráfica superior corresponde a la primera opción y se observa dicho salto, la nueva curva suavizada y su ecuación.

Volviendo a la ecuación 4.62, para una variación no muy grande del coeficiente de sustentación con el radio, se produce una fuerza de empuje mayor en los perfiles de la punta, habida cuenta de una mayor velocidad relativa incidente w . Para compensar este efecto la cuerda cerca de la punta es menor que en la raíz; en caso de no serlo se obtienen pérdidas elevadas fuera del punto de diseño.

A continuación se muestran las gráficas de las distribuciones de cuerda suavizadas para las cuatro opciones.

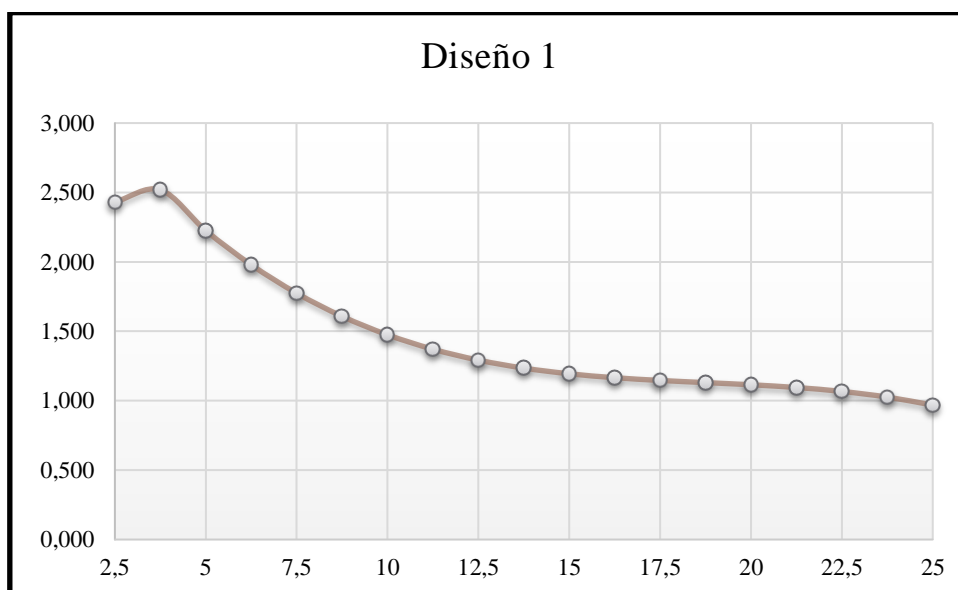


Ilustración 27: Distribución de cuerda - Diseño1

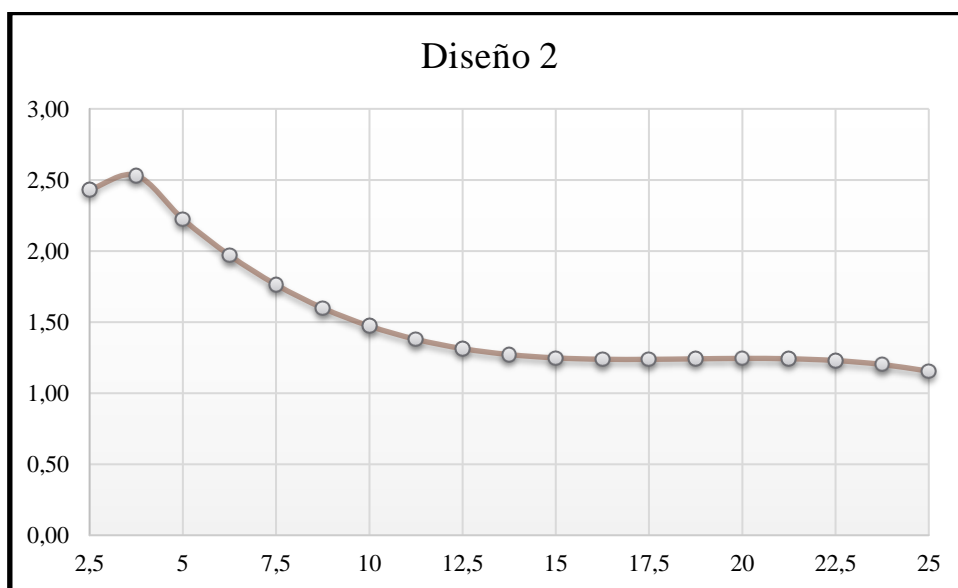


Ilustración 28: Distribución de cuerda – Diseño2

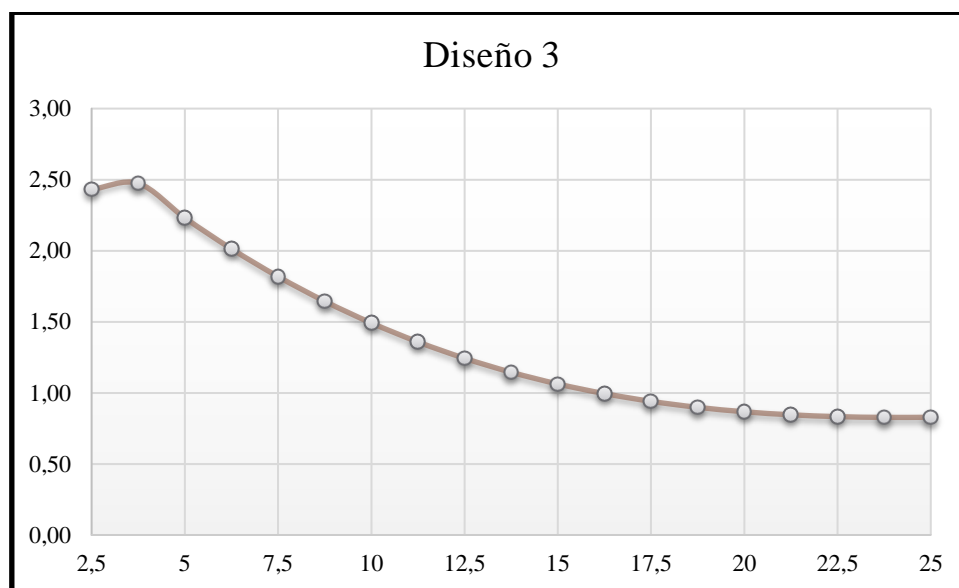


Ilustración 29: Distribución de cuerda – Diseño3

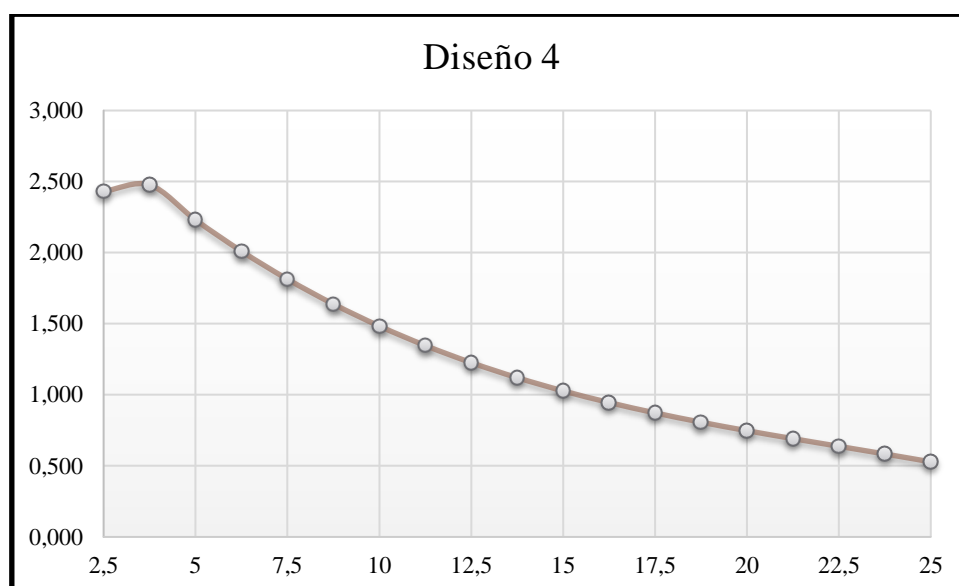


Ilustración 30: Distribución de cuerda – Diseño4

Tras ajustar las curvas se recalcula el número de Reynolds y se continua con el proceso iterativo. Con el nuevo número de Reynolds, se obtiene el valor de los coeficientes de sustentación y arrastre para cada tramo, a través de los datos de *JavaFoil*. Una vez son conocidos ambos coeficientes, se puede calcular la fuerza normal, el par motor y la potencia absorbida gracias a las ecuaciones 4.45, 4.46 y 4.47 respectivamente.

Se puede observar que son ecuaciones diferenciales y los datos de los que se dispone son una relación de valores discretos, así que se calculan los valores para cada tramo y posteriormente se definen curvas con esos puntos, mediante un ajuste por mínimos cuadrados.

La curva más interesante es la del momento o par motor, ya que en ella se puede observar si existen saltos bruscos y además, si el valor del par motor se multiplica por la velocidad angular se obtiene la potencia producida por el rotor.

Tras analizar las cuatro opciones, la pala que posee un mejor rendimiento es la tercera, formada por los perfiles S818, S830 y S831.

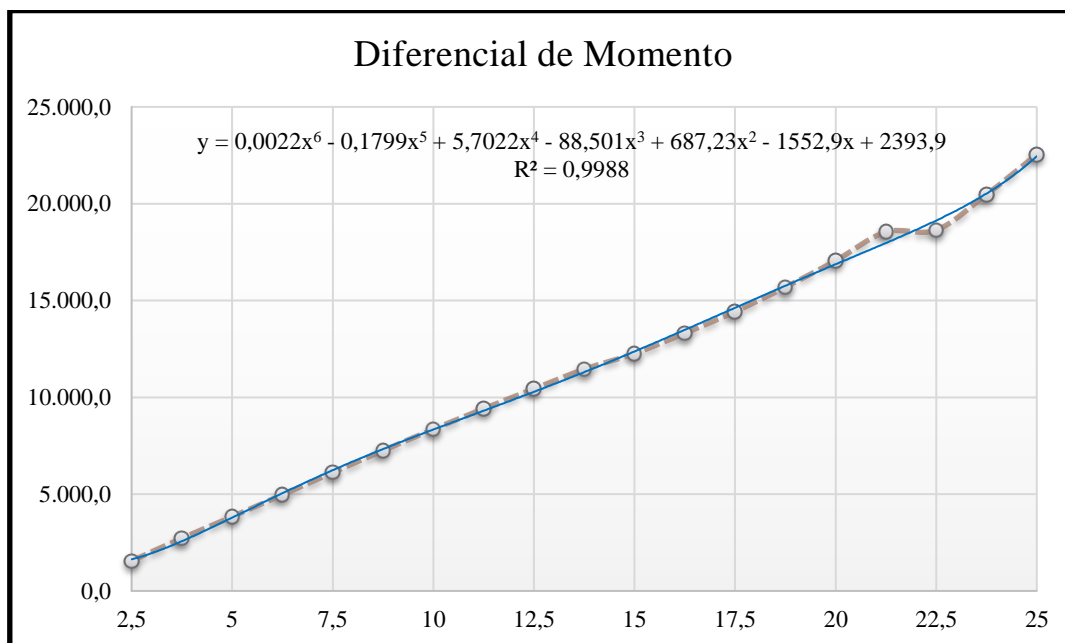


Ilustración 31: Curva diferencial de momento

Se puede observar que el coeficiente de regresión es de 0,9988, lo cual indica que se asume un error del 0,12%, valor bastante aceptable, tratándose de una curva de cierta complejidad.

Integrando la curva se obtiene un momento resultante de 217.952,7 Nm, que multiplicado por la velocidad angular $\Omega=2,4$ rad/s proporciona una potencia de 523,09 kW, que supera en un 4,6% el objetivo inicial de diseño.

A pesar de haberse obtenido una potencia mayor, hay que recordar que la máquina posee una transmisión mecánica, un generador eléctrico y varios dispositivos de transformación; todo ello acarrea una serie de pérdidas tanto mecánicas como eléctricas, por lo que es conveniente disponer de un pequeño margen de potencia.

4.9 Análisis computacional

Una vez se conocen las geometrías de los perfiles a emplear, sus ángulos de ataque óptimos y las velocidades a las que se van a someter, se ha realizado una pequeña simulación computacional de los perfiles así como del rotor.



La ingeniería asistida por ordenador dentro del campo de la aerodinámica y la mecánica de fluidos, ofrece herramientas conocidas por sus siglas en inglés CFD (*Computer Fluid Dynamics*).

4.9.1 Perfiles

Para el análisis de los perfiles el software empleado fue JavaFoil, el mismo que se ha utilizado para calcular los coeficientes de sustentación.

Dicho software posee una herramienta que crea simulaciones de las líneas de velocidad, útil para saber si se crean turbulencias, además de analizar mediante un mapa de colores el coeficiente de presión de los puntos del perfil.

El coeficiente de presión es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo. Cualquier punto de un perfil inmerso en el seno de un fluido tiene su propio coeficiente de presión (C_p).

Conocer cómo se distribuye dicho coeficiente a lo largo de la geometría de un perfil resulta útil a la hora de calcular las fuerzas que en él se producen, de hecho si se realiza la integral, para un perfil de cuerda unitaria, de la diferencia de distribuciones del C_p entre el borde de ataque y de salida, sobre la dirección de la cuerda, se obtiene el valor del coeficiente de sustentación.

$$C_p = \int_{BA}^{BS} \left(\frac{C_{pi}(x) - C_{pe}(x)}{C} \right) dx \quad (4.64)$$

BA y BS corresponden a los bordes de ataque y salida respectivamente, $C_{pi}(x)$ es la función que modela el coeficiente de presión en el intradós y $C_{pe}(x)$ en el extradós.

A continuación se van a analizar las líneas de velocidad y los valores del coeficiente de presión para los tramos de 8,75 m (Perfil S818), 18,75m (Perfil S830) y de 23,75m (Perfil 831).

- Perfil NREL S818:

Se realizará la simulación con una velocidad de 23 m/s y un ángulo de ataque de 12,5°.

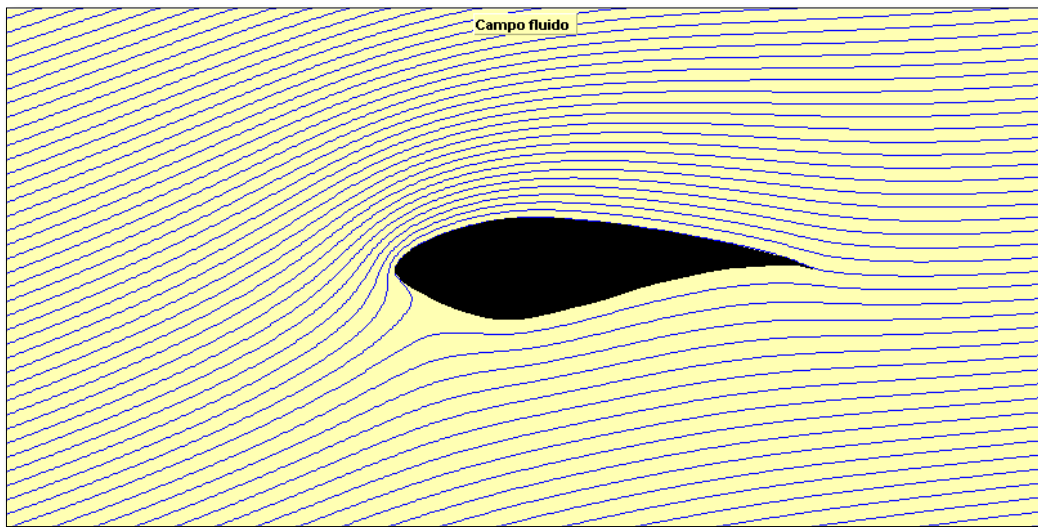
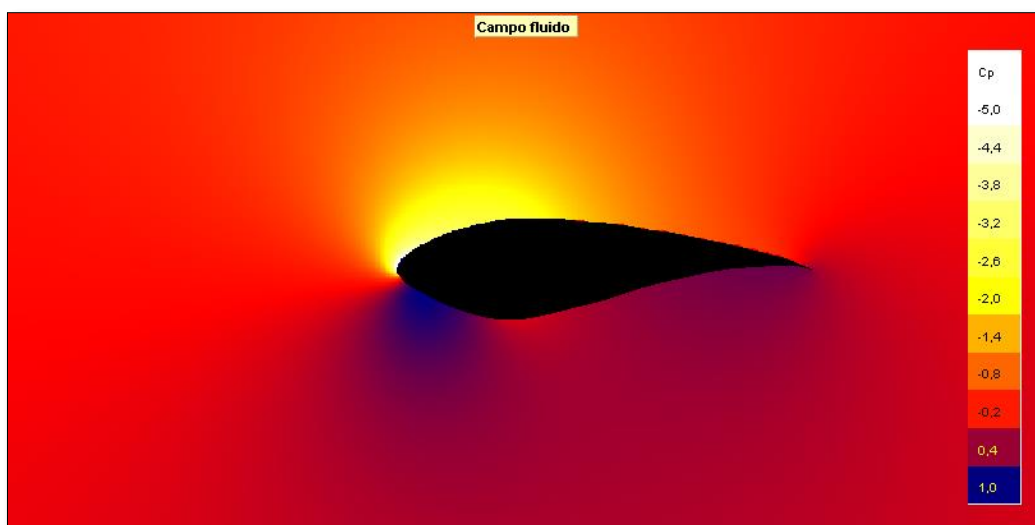


Ilustración 32: Líneas de velocidad S818

Se puede apreciar que en ningún momento existe desprendimiento de la capa límite.

Ilustración 33: Mapa de C_p S818

Tal y como se ha explicado en capítulos anteriores, se producen presiones más altas en el intradós, así como depresiones en el extradós, de esta forma se produce la sustentación en el álabe.

- Perfil 830:

En el tramo correspondiente a 18,75 m la velocidad relativa es de 45,98 m/s y el ángulo de ataque es de 11,5°.

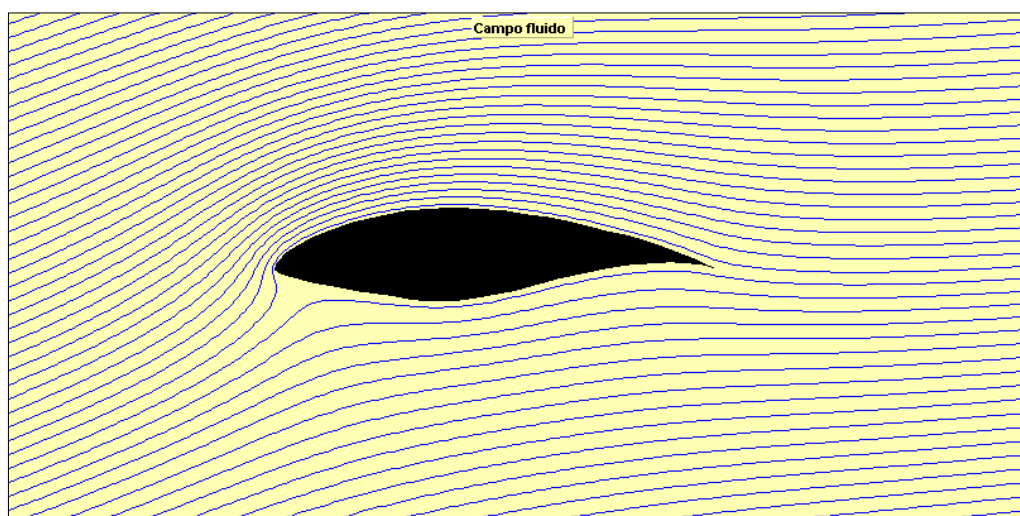
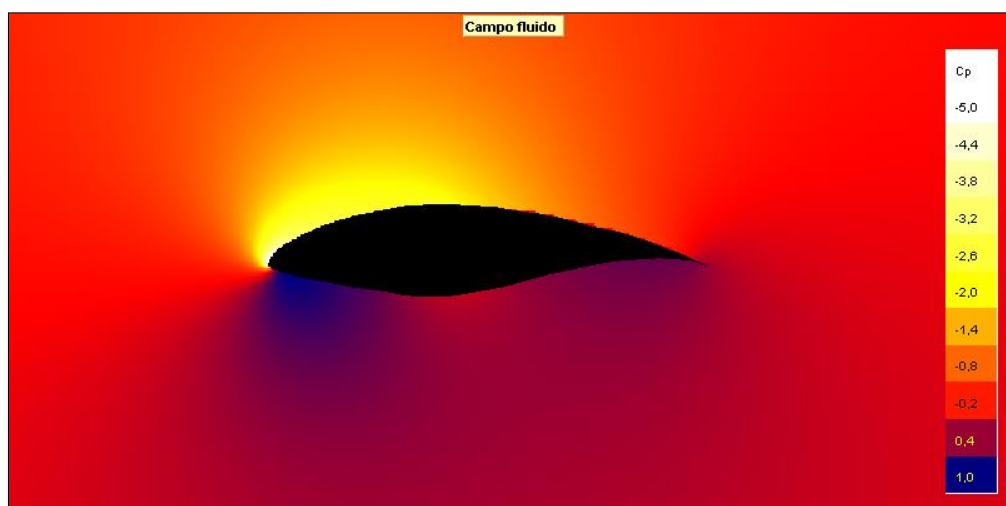


Ilustración 34: Líneas de velocidad S830

Ilustración 35: Mapa de C_p S830

Para este caso tampoco se observan desprendimientos de la capa límite.

○ Perfil 831:

En el tramo de 23,75m la velocidad relativa es de 57,77 m/s y el ángulo de ataque es 10,5°.

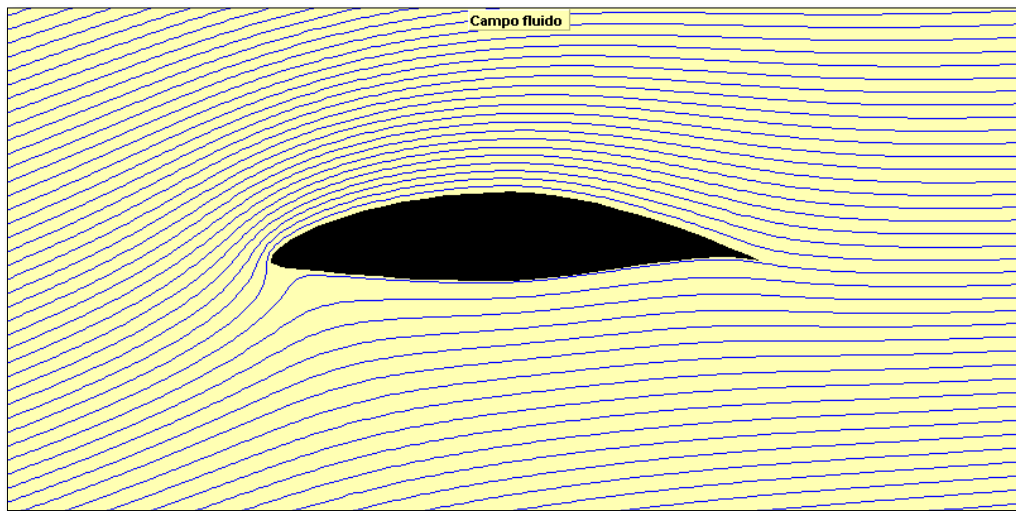
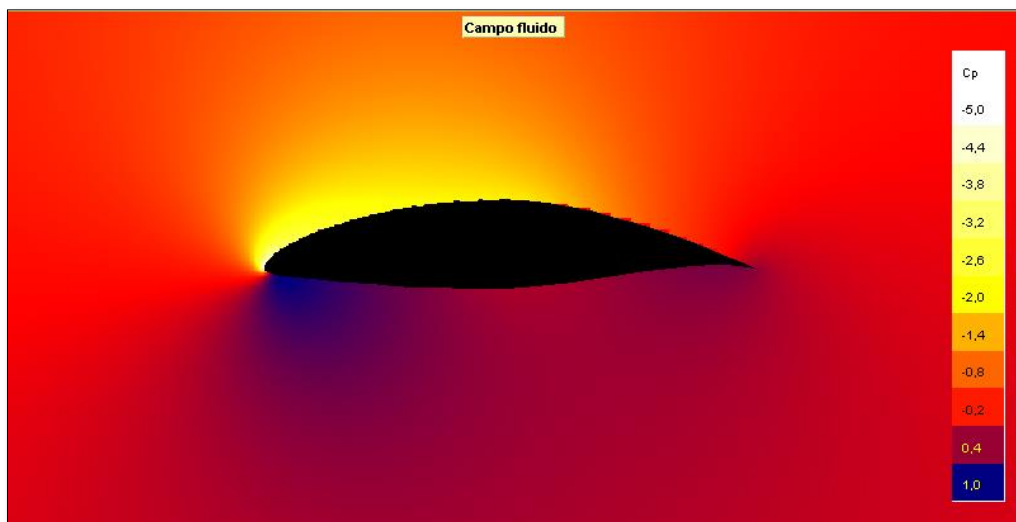


Ilustración 36: Líneas de velocidad S831

Ilustración 37: Mapa de C_p S830

Sigue sin haber desprendimientos en la capa límite.

4.9.2 Rotor

En el caso del análisis del conjunto rotor el software empleado fue ANSYS en su versión 18.

A la hora de hacer un análisis de ingeniería computacional es necesario realizar una serie de operaciones, como son el mallado, una vez se ha dibujado la geometría, el preprocesado, el cálculo o resolución de la malla, y por último el postprocesado.

Hay programas específicos para realizar cada una de las operaciones, pero ANSYS dispone de las herramientas necesarias para realizar todos estos pasos.

El *solver* empleado fue FLUENT, un módulo implementado en ANSYS que es capaz de resolver problemas de dinámica de fluidos.

Para analizar el comportamiento de la turbina de forma no estacionaria, es decir, mientras gira el rotor, se definen dos volúmenes.

Se define un cilindro cuyo diámetro coincide con el del rotor y su altura corresponde al espesor, el cual englobará al rotor y será un cuerpo giratorio. El segundo será el volumen de control, fijo y de mayor dimensión que el anterior.

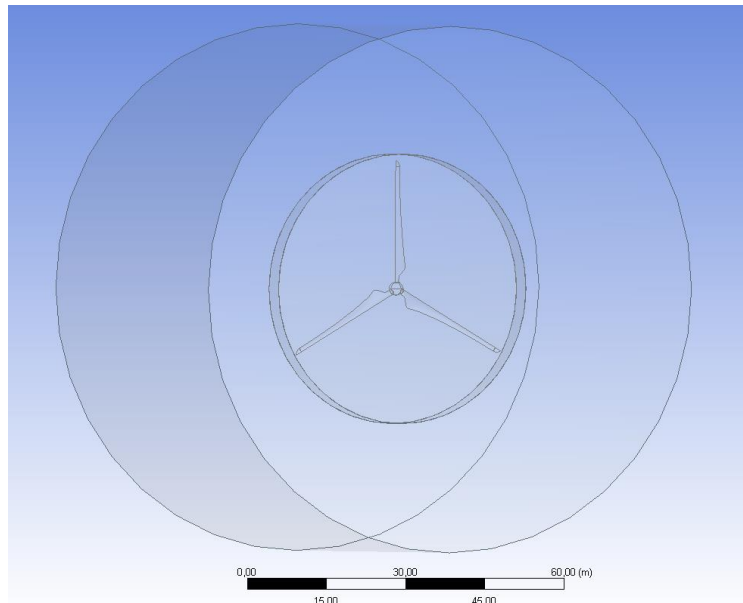


Ilustración 38: Volumen de control y cuerpo giratorio

En cuanto al mallado, se ha mallado la geometría con una función de curvatura, la cual se adapta muy bien a este tipo de problemas, ya que reduce el tamaño del elemento si hay presente una zona con secciones no planas, y permite un elemento más grande en secciones planas o con menor curvatura.

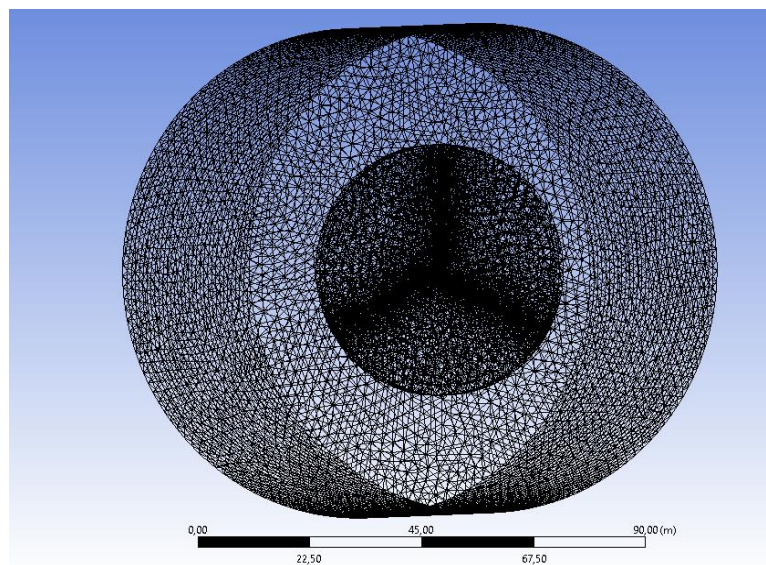


Ilustración 39: Mallado

La sección anterior del cilindro se ha definido como entrada y la sección posterior como salida. La simulación se realiza en condiciones nominales, por lo que la velocidad del viento es de 10 m/s y la velocidad de rotación es de 2,4 rad/s.

Tras resolver el problema se puede apreciar el rumbo que siguen las líneas de flujo del aire, al pasar por la turbina. Se han calculado un total de 100 líneas.

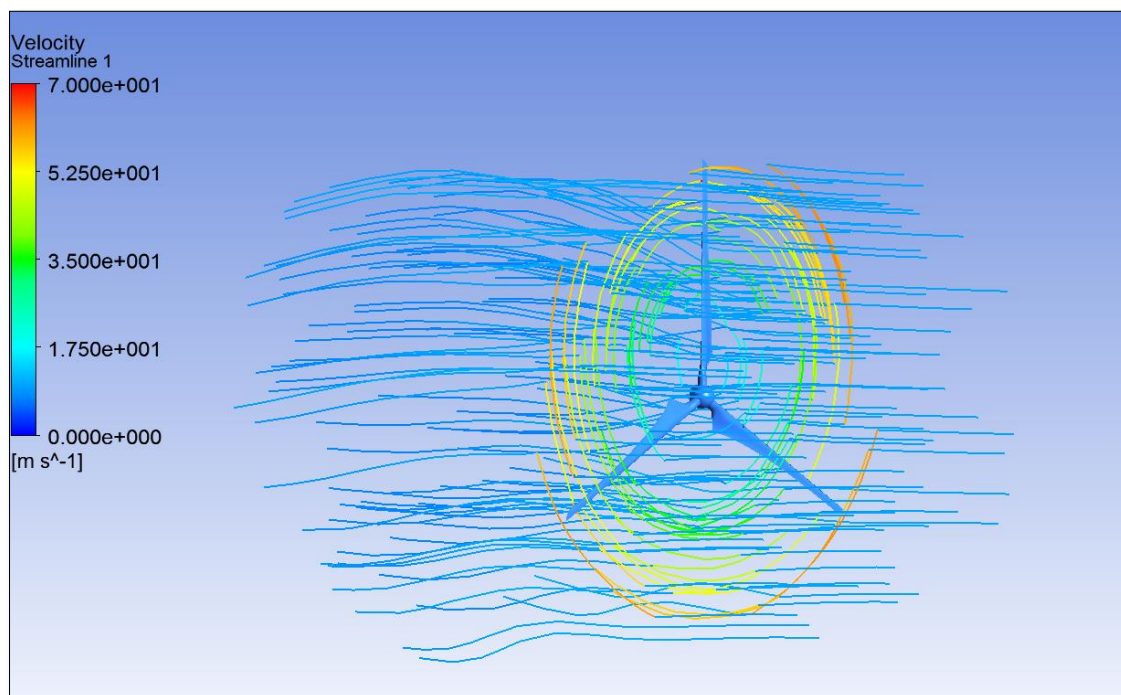


Ilustración 40: Flujo de aire en la turbina

A continuación se muestran unas ilustraciones en las cuales se refleja la diferencia de presiones existente entre la sección de entrada y de salida, siguiendo lo demostrado en las teorías del disco actuador.

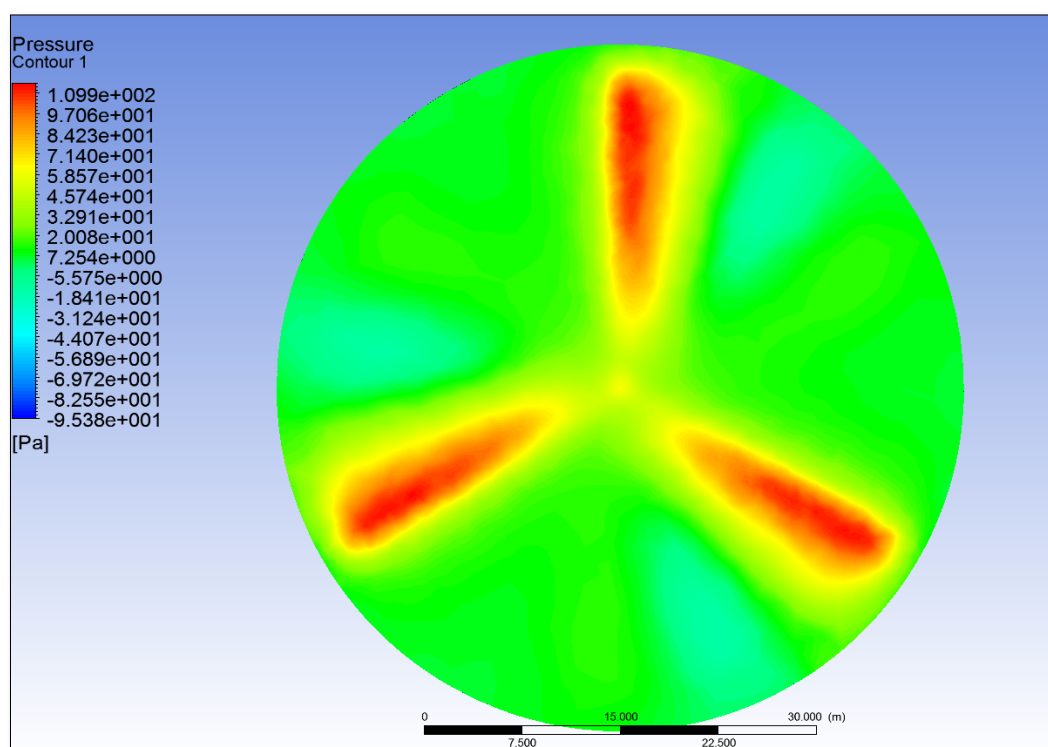


Ilustración 41: Mapa de presiones a la entrada

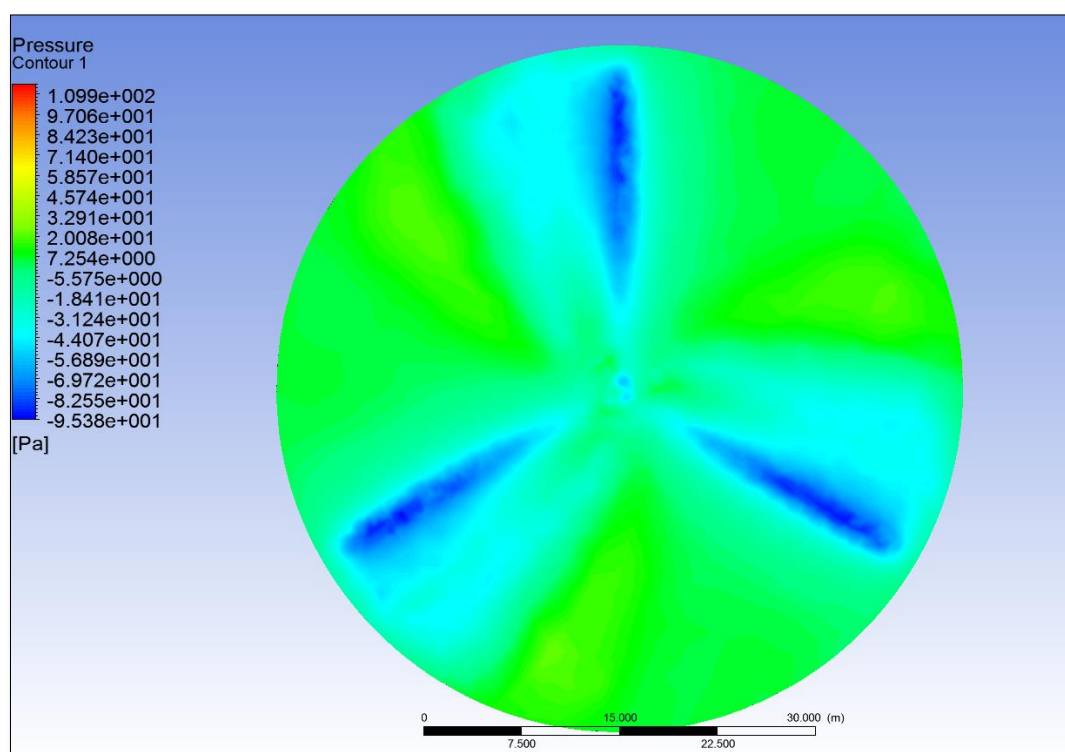


Ilustración 42: Mapa de presiones a la salida

Tras calcular las líneas de velocidad, a través de un gráfico (Ilustración 43) se muestra los cambios de presión que sufren dichas líneas a su paso por la turbina.

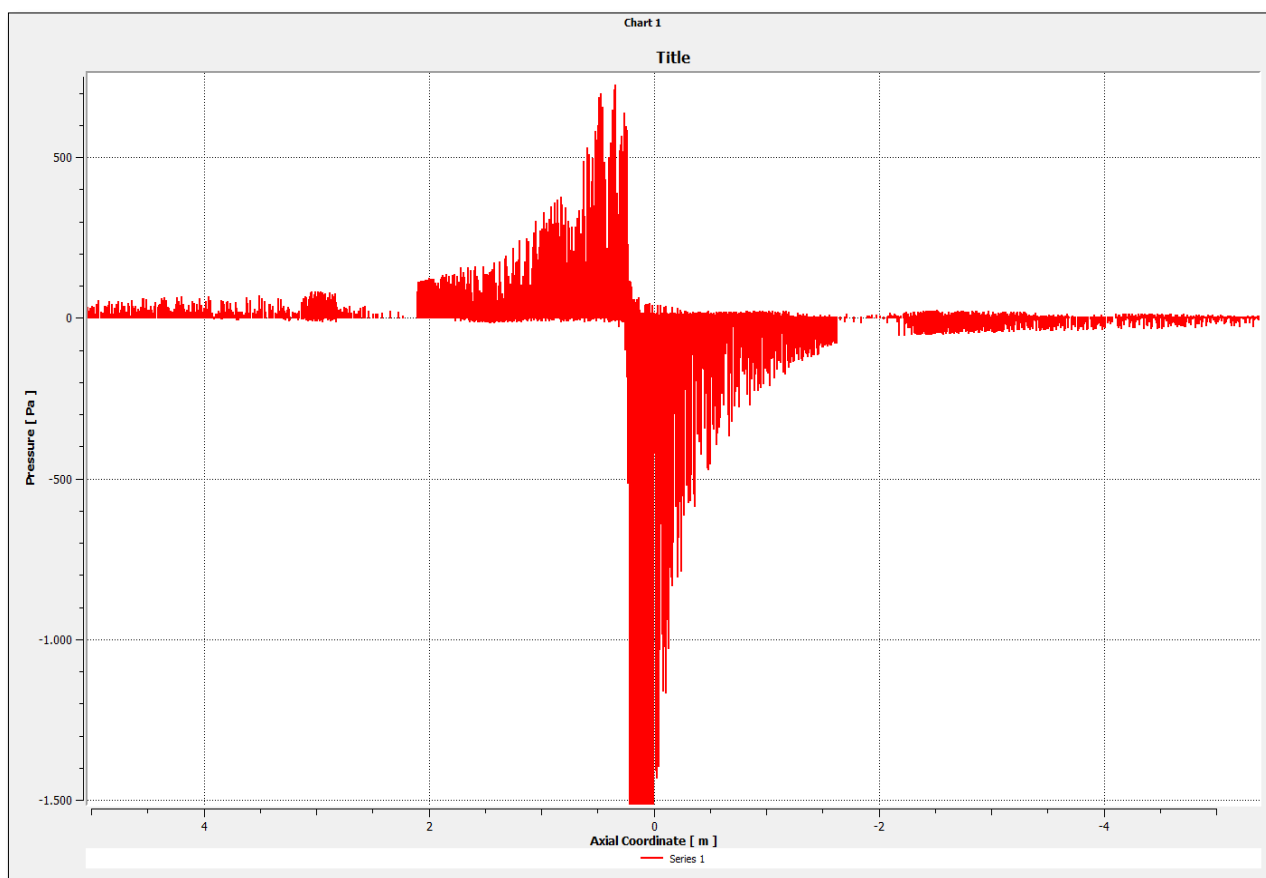


Ilustración 43: Presión en líneas de velocidad



5 ACTUACIÓN DE LA AEROTURBINA

Tras el diseño aerodinámico de la turbina se han obtenido una serie de conclusiones, las cuales se van a exponer a continuación.

5.1 Rangos de funcionamiento

Como se ha visto antes, la turbina comenzará a girar a partir de una velocidad de viento de 3 m/s y alcanzará su potencia nominal a los 10 m/s, a partir de ahí trabajará a potencia nominal hasta la velocidad de corte, que se ha establecido en 20 m/s.

Cuando se sobrepasa la velocidad de corte, las palas del aerogenerador entran en una posición de “bandera”, de tal forma que no se genere ninguna fuerza que provoque par en el rotor.

5.2 Parámetros característicos

5.2.1 Coeficiente de potencia

En cuanto al coeficiente de potencia, éste toma un valor de *0,458*, que comparado con el máximo teórico (Límite de Betz), indica que se está obteniendo un 81,5% de la máxima potencia aprovechable de la energía cinética del viento.

5.2.2 Coeficiente de par

El coeficiente de par se define a partir del coeficiente de potencia como:

$$C_M \equiv \frac{C_P}{\lambda} \quad (5.1)$$

Por lo que la curva de par no aporta mayor información que la de potencia en cuanto a prestaciones. No obstante, la solidez σ afecta notablemente sobre el comportamiento de esta curva, aumentando el C_M máximo con el incremento de la solidez.

Para la turbina diseñada, C_M toma un valor de *0,076*.

5.3 Fuerzas producidas

Tal y como se ha expuesto anteriormente en la actuación de un perfil aerodinámico intervienen una serie de fuerzas, éstas han de ser analizadas teniendo en cuenta el funcionamiento de la máquina. En el perfil aerodinámico se producen unas fuerzas de sustentación y arrastre, que como se ha mencionada en el capítulo 4 se proyectan sobre los ejes de interés, dando lugar a una fuerza normal, F_n y a una fuerza tangencial F_t .

Para el diseño propuesto y en régimen nominal, poseen un valor de 93.079,7 N, la componente normal y de 8.718,1 N la tangencial.

Es preciso señalar que dichas fuerzas han sido obtenidas de la distribución de perfiles, la cual no abarca la longitud completa de la pala, lo que provoca que esta cifra sea sensiblemente menor que la real. Para un futuro diseño estructural, convendría mayorar dichas fuerzas, al menos en un 20%, ya que de los 25 m que mide la pala solo han sido analizados 20m.

5.4 Curva de potencia

Tras haber calculado la potencia que suministra la turbina a la velocidad nominal, se calculan las potencias correspondientes a las velocidades inferiores a ésta.

Velocidad (m/s)	Potencia (kW)	Cp
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	46,01	0,040
4	84,74	0,074
5	134,26	0,117
6	195,63	0,171
7	268,74	0,235
8	354,41	0,310
9	450,36	0,394
10	523,09	0,458
11	523,09	0,458
12	523,09	0,458
13	523,09	0,458
14	523,09	0,458
15	523,09	0,458
16	523,09	0,458
17	523,09	0,458
18	523,09	0,458
19	523,09	0,458
20	523,09	0,458

Tabla 5: Funcionamiento de la aeroturbina

A continuación se muestra la curva de potencia resultante para todo el rango de velocidades.

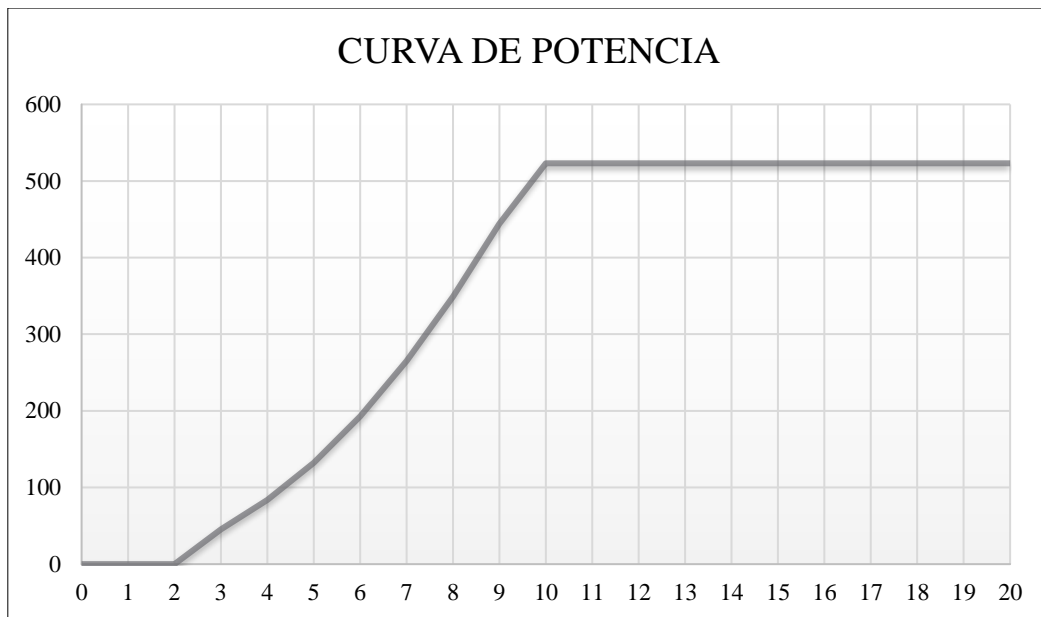


Ilustración 44: Curva de potencia

5.5 Producción energética

Conociendo la curva de potencia así como la distribución de velocidades de viento de Weibull, se puede calcular la producción energética anual de la aeroturbina.

La producción energética para cada velocidad sigue la siguiente expresión:

$$\text{Energía producida(kWh)} = p(v) \cdot P(kW) \cdot 8760 \quad (5.2)$$

$p(v)$ corresponde a los valores tomados por la distribución de Weibull para cada velocidad y 8.760 son las horas que posee un año, factor que hace que la energía producida se exprese en kWh.

V (m/s)	p(v)	Energía (kWh)
0	0,0000	0,0
1	0,0078	0,0
2	0,0403	0,0
3	0,0993	39663,9
4	0,1689	124121,9
5	0,2158	250743,1
6	0,2087	353645,9
7	0,1495	347914,5
8	0,0764	234421,6
9	0,0266	103603,6
10	0,0059	27308,2
11	8,07E-04	3708,2
12	6,24E-05	286,6
13	2,57E-06	11,8
14	5,23E-08	0,2

Tabla 6: Producción anual

En la tabla se puede observar la producción anual correspondiente a cada velocidad, que suman un total de 1.4854,4 MWh anuales. Para velocidades superiores a 14 m/s la potencia extraída al cabo de un año es insignificante.

Con esta cifra se podría cubrir la demanda de energía eléctrica de 425 hogares en España. (Fuente IDAE).



6 REFERENCIAS

6.1 Bibliografía

UNE 50135:1996 Documentación. Presentación de informes científicos y técnicos.

Ervin Bossányi, Nick Jenkins, David Sharpe, Tony Burton.: Wind Energy Handbook.

Juan Luís Prieto Ortiz: Máquinas e Instalaciones Hidráulicas y Eólicas.

Miguel Villarubia López: Ingeniería de la Energía Eólica.

GWEC, Global Wind 2017 Report.

Antonio Creus Solé: Aerogeneradores.

Daniel Rodrigo González: Diseño preliminar de un aerogenerador de 4,5 MW de potencia. Proyecto Fin de Carrera Universidad Politécnica de Madrid.

José Alberto Navarro Martínez: Diseño preliminar de un aerogenerador de 3MW. Proyecto Fin de Carrera Universidad Politécnica de Madrid.

Daniel Torroglosa Giner: Diseño de un aerogenerador de 1,8 MW. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Cartagena.

6.2 Enlaces

Global Wind Energy Council (GWEC): <http://www.gwec.net/>

Agencia Vasca de Meteorología: <http://www.euskalmet.euskadi.eus/>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE): <http://www.idae.es/>

National Renewable Energy Laboratory: <https://wind.nrel.gov/airfoils/>

Centro nacional de Energías Renovables: <http://www.cener.com/>

Danish Wind Industry Association: <http://www.windpower.org/>

Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia: <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/FGLONGATT-R-2009-12.pdf>

Renovables Verdes: <https://www.renovablesverdes.com/>



6.3 Software

ANSYS Workbench 18.1

ANSYS Fluent

ANSYS CFD-Post

Autodesk AutoCAD 2015

JavaFoil

Microsoft Office 2013

PTC Creo Parametric 3.0 (Versión Student)



ANEXO

Aerodinámica de Aerogenerador de eje Horizontal de 500 kW



2017-2018
UNIVERSIDAD DE LA RIOJA
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



ÍNDICE DE CAPÍTULOS

1	EMPLAZAMIENTO.....	4
2	CÁLCULO DEL AÑO TIPO	5
3	DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	7
4	TRATAMIENTO DE LOS DATOS EÓLICO	8
4.1	Ley de Weibull.....	8
4.2	Variación de los parámetros de Weibull con la altura	10
4.3	Potencial eólico.....	10
5	DISEÑO AERODINÁMICO	11
5.1	Rotor	11
5.1.1	Palas.....	11
5.1.2	Perfiles.....	12
5.2	Diseño 1	15
5.3	Diseño 2	17
5.4	Diseño 3	18
5.5	Diseño 4	19
6	DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR	22
6.1	Pala.....	22
6.2	Buje.....	24
6.3	Rotor	25
7	SIMULACIÓN	27
7.1	Mallado	28
7.2	Preprocesado.....	29
7.3	Cálculo	30
7.4	Postprocesado	31
8	ACTUACIÓN DE LA TURBINA	32



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

Tabla 1: Coordenadas UTM	4
Ilustración 1: Imagen de satélite	4
Ilustración 2: Filtro de búsqueda de la base de datos	5
Ilustración 3: Enlace de descarga	5
Tabla 2: Intervalos de direcciones	7
Tabla 3: Frecuencia de las direcciones	7
Tabla 4: Frecuencia de las velocidades	8
Tabla 5: Valores de la recta de ajuste	9
Ilustración 4: Recta de ajuste	9
Tabla 6: Parámetros de Weibull con altura	10
Tabla 7: Datos de partida	11
Tabla 8: Cálculos rotor	11
Tabla 9: Cálculos pala	12
Tabla 10: Perfil S816	13
Tabla 11: Perfil S817	13
Tabla 12: Perfil S818	13
Tabla 13: Perfil S827	14
Tabla 14: Perfil S828	14
Tabla 15: Perfil S830	14
Tabla 16: Perfil S831	15
Tabla 17: Perfil S832	15
Tabla 18: Cálculos diseño 1	16
Ilustración 5: Función diferencial de momento diseño 1	16
Tabla 19: Cálculos diseño 2	17
Ilustración 6: Función diferencial de momento diseño 2	17
Tabla 20: Cálculos diseño 3	18
Ilustración 7: Función diferencial de momento diseño 3	19
Tabla 21: Cálculos diseño 4	20
Ilustración 8: Función diferencial de momento diseño 3	20
Ilustración 9: Superficie de la punta	22
Ilustración 10: Mezcla barrida	24
Ilustración 11: Buje 1	24



ANEXO

Ilustración 12: Buje 2	24
Tabla 22: Posiciones relativas y cuerdas de cada perfil	25
Ilustración 13: Rotor.....	26
Ilustración 14: Geometría analizada	27
Tabla 23: Parámetros de mallado	28
Ilustración 15: Malla del rotor	29
Ilustración 16: Datos del cuerpo giratorio	29
Ilustración 17: Parámetros de cálculo.....	30
Tabla 24: Velocidades angulares	32

1 EMPLAZAMIENTO

Tal y como se ha expuesto en la memoria el estudio de los vientos se ha realizado a partir de los datos de la estación meteorológica de Moreda de Álava, que se encuentra situada en las siguientes coordenadas:

Longitud UTM:	548437
Latitud UTM:	4708613

Tabla 1: Coordenadas UTM

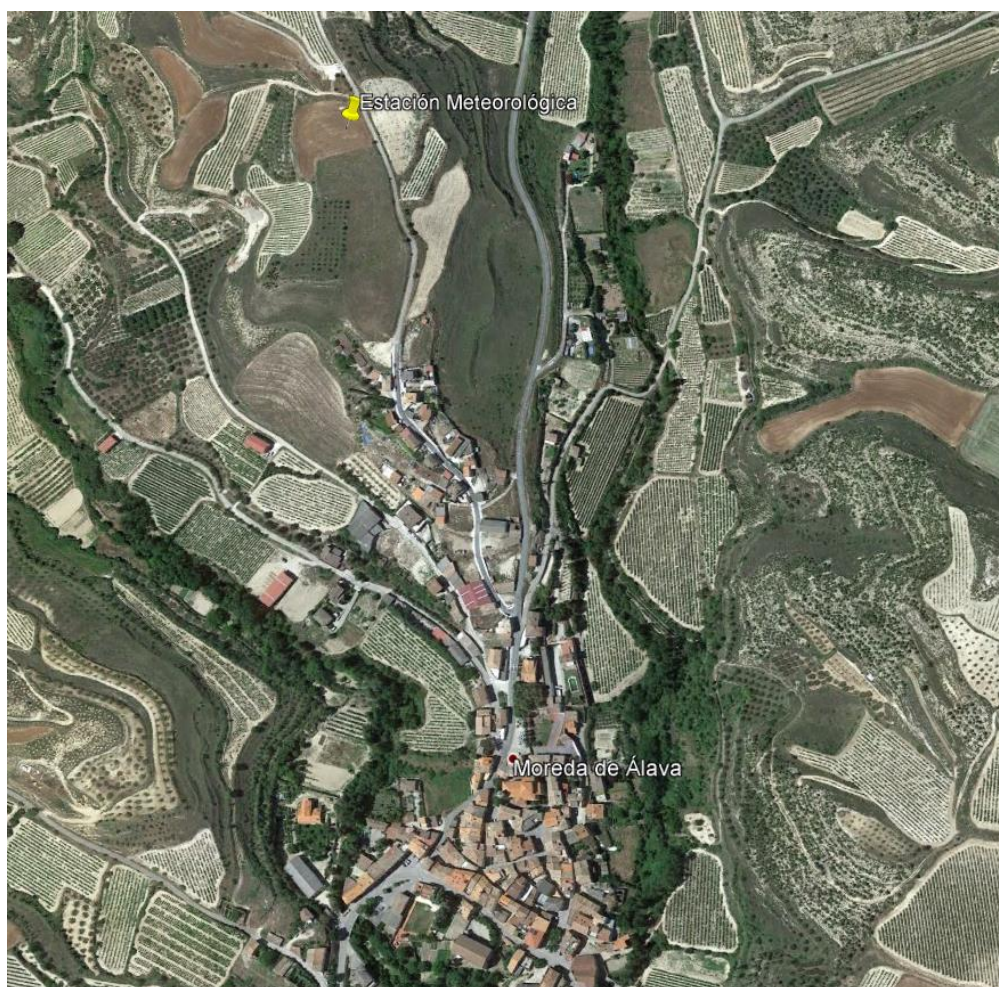


Ilustración 1: Imagen de satélite

2 CÁLCULO DEL AÑO TIPO

Para el cálculo del año tipo se han descargado los datos de velocidades y direcciones de los vientos “*diezminutales*” de la estación meteorológica de Moreda, para los cinco años de estudio.

A continuación se muestra una imagen del filtro de búsqueda de la base de datos de Euskalmet “*Open Data*”.

Ilustración 2: Filtro de búsqueda de la base de datos

Para descargar los datos hay que filtrar introduciendo el año deseado y datos de estaciones meteorológicas y se mostrará un enlace como el que se muestra a continuación.

Estaciones meteorológicas: lecturas recogidas en el 2013

Datos en formato: [XML](#) (121 MB)

Datos Meteorológicos 31/01/2013

Gobierno Vasco

Ilustración 3: Enlace de descarga

Al pinchar sobre el enlace se descarga un fichero con los datos recogidos por todas las estaciones del País Vasco, entre las cuales se incluye la de Moreda, cuyo código es C031.

Al descomprimir el archivo correspondiente, se encuentran los datos meteorológicos distribuidos por meses. (Por cada mes un archivo .xml).

Tras obtener los datos de todos los meses para los cinco últimos años, se han seleccionado solo los de interés (velocidad y dirección del viento), y se han agrupado por años, en la hoja de cálculo adjunta llamada “*Cálculos*”.

Una vez se tienen estructurados los datos, se realiza el promedio de las cinco lecturas correspondientes a cada periodo para así obtener el año tipo.



3 DIRECCIÓN DEL VIENTO

A la hora de analizar los datos de las direcciones se ha elaborado otra hoja de cálculo llamada “*Direcciones*”, la cual contiene los datos de las direcciones del viento correspondientes a cada año, así como un año tipo de dichos valores.

El objetivo de estudiar las direcciones no es más que el de elaborar una rosa de los vientos, calculando previamente las frecuencias de cada dirección. Existen rosas de los vientos que presentan hasta 32 direcciones, pero para el presente estudio con las ocho principales es suficiente

Los datos facilitados venían expresados según la orientación en grados por lo que primero hay que establecer unos intervalos para cada dirección.

DIRECCIÓN	
N	337,5º - 22,5º
NE	22,5º - 67,5º
E	67,5º - 112,5º
SE	112,5º - 157,5º
S	157,5º - 202,5º
SW	157,5º - 247,5º
W	247,5º - 292,5º
NW	292,5º - 337,5º
N	337,5º - 360º

Tabla 2: Intervalos de direcciones

A continuación se muestra la tabla de frecuencias obtenida:

DIRECCIÓN	FRECUENCIA	F. RELATIVA
N	0	0
NE	26	0,003
E	211	0,0241
SE	791	0,0903
S	1940	0,2215
SW	3179	0,3629
W	2135	0,2437
NW	478	0,0546
Total	8760	

Tabla 3: Frecuencia de las direcciones

Como la rosa de los vientos ya se ha ilustrado en la memoria se omitirá en esta sección.

4 TRATAMIENTO DE LOS DATOS EÓLICO

A continuación se detallarán los cálculos realizados para obtener una distribución continua de datos, a partir de los datos obtenidos de la estación meteorológica.

Tras realizar el año tipo se obtiene la siguiente tabla calculando las frecuencias en intervalos de 0,5 m/s.

INTERVALO	FRECUENCIA (horas)	FREC. RELATIVA	FREC. REL. ACUMULADA		
v(m/s)	Máximo	Central		fi	Fi
0<v<0,5	0,5	0,25	0	0	0
0,5<v<1	1	0,75	4	0,000455425	0,000455425
1<v<1,5	1,5	1,25	57	0,00648981	0,006945235
1,5<v<2	2	1,75	298	0,033929181	0,040874416
2<v<2,5	2,5	2,25	707	0,080496414	0,12137083
2,5<v<3	3	2,75	1252	0,142548104	0,263918934
3<v<3,5	3,5	3,25	1487	0,169304338	0,433223272
3,5<v<4	4	3,75	1527	0,17385859	0,607081863
4<v<4,5	4,5	4,25	1194	0,135944438	0,743026301
4,5<v<5	5	4,75	829	0,094386884	0,837413185
5<v<5,5	5,5	5,25	633	0,072071046	0,909484231
5,5<v<6	6	5,75	394	0,044859387	0,954343618
6<v<6,5	6,5	6,25	224	0,025503814	0,979847433
6,5<v<7	7	6,75	84	0,00956393	0,989411363
7<v<7,5	7,5	7,25	50	0,005692816	0,995104179
7,5<v<8	8	7,75	24	0,002732552	0,99783673
8<v<8,5	8,5	8,25	14	0,001593988	0,999430718
8,5<v<9	9	8,75	5	0,000569282	1
TOTAL			8783	1	

Tabla 4: Frecuencia de las velocidades

4.1 Ley de Weibull

A partir de estos datos se calcula la distribución continua de velocidades, gracias a la ley de Weibull.

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4.1)$$

Donde v es la velocidad del viento, c es el factor de escala (valor próximo a la media) y k es el factor de forma, que caracteriza la simetría o sesgo de la función.

Primero se calculan los parámetros k y c ajustando por mínimos cuadrados la recta obtenida al representar en un gráfico.

$$y = \ln[-\ln(1 - F)]; \quad x = \ln v \quad (4.2)$$

$\ln(-\ln(1-F))$	$\ln(v)$
Y	X
-7,6940512	-0,28768207
-4,96621674	0,22314355
-3,17645686	0,55961579
-2,04490604	0,81093022
-1,18281481	1,01160091
-0,56600394	1,178655
-0,06811398	1,32175584
0,30658837	1,44691898
0,59693534	1,55814462
0,87639797	1,65822808
1,12707401	1,74919985
1,36211016	1,83258146
1,51468182	1,9095425
1,67135548	1,98100147
1,81419496	2,04769284
2,01104698	2,1102132

Tabla 5: Valores de la recta de ajuste

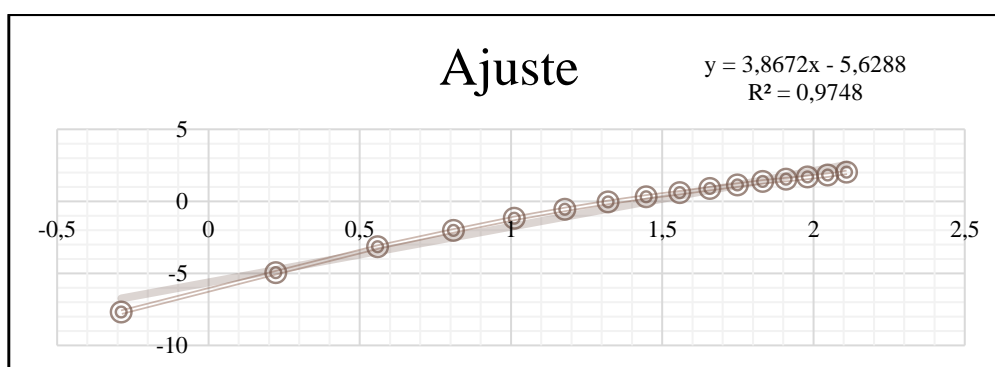


Ilustración 4: Recta de ajuste

Tras ajustar los valores de la tabla 5 mediante una recta por mínimos cuadrados se obtiene la siguiente ecuación: $y = 3,8672x - 5,6288$.

La pendiente proporciona el valor de k , y el valor de c viene dado por:

$$c = e^{-(B/k)} \quad (4.3)$$

Se tiene por tanto una distribución de Weibull con parámetros $k=3,867$ y $c= 4,287$, la cual se ha representado en la ilustración 10 de la memoria.



4.2 Variación de los parámetros de Weibull con la altura

Para la corrección por altura de los parámetros anteriormente calculados se parte de la siguiente ecuación:

$$k' = k \left(\frac{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right)}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z'}{10} \right)} \right) \quad (4.4)$$

$$c' = c \left(\frac{z'}{z} \right)^{\beta} \quad (4.5)$$

$$\beta = \frac{0,37 - 0,088 \ln c}{1 - 0,088 \ln \left(\frac{z}{10} \right)} \quad (4.6)$$

Altura estación (z)		13,2 m	
z'	50	k'	3,40
β	0,25	c'	5,96

Tabla 6: Parámetros de Weibull con altura

4.3 Potencial eólico

El potencial eólico se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{P_d}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.7)$$

Para la velocidad nominal de 10 m/s el potencial eólico toma un valor de 582,99 W/m².

Como el rotor diseñado tiene un radio de 25 m, el área barrida equivale a 1963,50 m², y la potencia máxima extraíble de la corriente del viento es de 1.144,71 kW.

5 DISEÑO AERODINÁMICO

5.1 Rotor

A continuación se muestra una tabla con los datos de partida del diseño:

Datos de entrada	
D. rotor	50 m
Altura torre	50 m
V. arranque	3 m/s
V. nominal	10 m/s
V. corte	20 m/s
N. palas	3

Tabla 7: Datos de partida

Con estos datos se procede a calcular los parámetros que caracterizan al rotor, con las ecuaciones ya expuestas en la memoria.

En primer lugar se calcula la velocidad de rotación, de manera que no se sobrepasen los 60 m/s en el extremo de la pala y a continuación con la ecuación 5.1 se obtiene el valor de λ .

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (5.1)$$

Tras conocer el TSR (λ) se calculan el resto de parámetros:

Cálculos	
Ω	2,4
λ	6,00
ϕ_{op}	0,110
Λ	0,006
σC_L	0,024
a	0,33266
a'	0,00613

Tabla 8: Cálculos rotor

5.1.1 Palas

Conocidas las características generales del rotor se extrapolan a cada una de las palas. Las tres palas del rotor son idénticas, por lo que solo se realizan los cálculos para una pala.

Se ha dividido la pala en 20 tramos, los datos calculados para el rotor, corresponden a la punta de pala, por lo que los datos del último tramo coinciden con los del rotor.



Los cálculos realizados son idénticos a los anteriores, con la salvedad de que a cada tramo le corresponde una velocidad específica (λ_r).

$$\lambda = \frac{\Omega r}{U} \quad (5.2)$$

x	λ_r	ϕ_{op} (°)	Λ	a	a'	w (m/s)
0	0	0	0	0	0	10,00
1,25	0	48,87	0	0,284	1	9,51
2,5	0,60	39,36	0,227	0,304	0,415	10,98
3,75	0,9	32,01	0,152	0,315	0,218	12,93
5	1,2	26,54	0,105	0,321	0,133	15,20
6,25	1,5	22,46	0,076	0,324	0,089	17,68
7,5	1,8	19,37	0,057	0,327	0,064	20,30
8,75	2,1	16,98	0,044	0,328	0,048	23,00
10	2,4	15,08	0,034	0,329	0,037	25,78
11,25	2,7	13,55	0,028	0,330	0,029	28,59
12,5	3,0	12,29	0,023	0,331	0,024	31,44
13,75	3,3	11,24	0,019	0,331	0,020	34,32
15	3,6	10,35	0,016	0,332	0,017	37,21
16,25	3,9	9,59	0,014	0,332	0,014	40,12
17,5	4,2	8,93	0,012	0,332	0,012	43,04
18,75	4,5	8,35	0,011	0,332	0,011	45,98
20	4,8	7,85	0,009	0,332	0,010	48,92
21,25	5,1	7,40	0,008	0,332	0,008	51,86
22,5	5,4	6,99	0,007	0,333	0,008	54,82
23,75	5,7	6,63	0,007	0,333	0,007	57,77
25	6,0	6,31	0,006	0,333	0,006	60,74

Tabla 9: Cálculos pala

Se ha calculado el valor de la velocidad relativa en cada tramo, mediante el triángulo de velocidades.

5.1.2 Perfiles

A continuación se muestran unas tablas con los valores de C_D y C_L para un determinado rango de número de Reynolds, además se ha calculado el valor de ε , parámetro que indica la calidad aerodinámica del perfil; cuanto más se acerca a 0 mejor es el perfil.

$$\varepsilon = \frac{C_D}{C_L} \quad (5.3)$$

○ Perfil NREL-S816

Re	Cl máx	Cd	α
3000000	1,447	0,027	12
3200000	1,450	0,026	12
3400000	1,453	0,026	12
3600000	1,456	0,026	12
3800000	1,459	0,025	12
4000000	1,462	0,025	12
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,455	0,026	

Tabla 10: Perfil S816

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0178$.

○ Perfil NREL-S817

Re	Cl máx	Cd	α
3800000	1,375	0,016	10,5
3900000	1,376	0,016	10,5
4000000	1,377	0,016	10,5
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,376	0,016	

Tabla 11: Perfil S817

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0116$.

○ Perfil NREL-S818

Re	Cl máx	Cd	α
1000000	1,867	0,039	13
1500000	1,912	0,030	12
2000000	1,942	0,029	12,5
2500000	1,965	0,030	12,5
3000000	1,985	0,028	13
3500000	1,999	0,029	13
4000000	2,005	0,028	13
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,954	0,030	

Tabla 12: Perfil S818

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0156$.

○ Perfil NREL-S827

Re	Cl máx	Cd	α
3200000	1,344	0,023	11
3400000	1,346	0,023	11
3600000	1,348	0,022	11
3800000	1,349	0,022	11
4000000	1,351	0,022	11
4200000	1,352	0,022	11
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,35	0,022	

Tabla 13: Perfil S827

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0166$.

○ Perfil NREL-S828

Re	Cl máx	Cd	α
4400000	1,238	0,019	11
4500000	1,239	0,019	11
4600000	1,239	0,019	11
4700000	1,240	0,019	11
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,24	0,019	

Tabla 14: Perfil S828

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0151$.

○ Perfil NREL-S830

Re	Cl máx	Cd	α
2200000	1,919	0,030	11,5
2400000	1,924	0,029	11,5
2600000	1,928	0,029	11,5
2800000	1,930	0,028	11,5
3000000	1,933	0,029	11,5
3200000	1,937	0,029	12
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,935	0,029	

Tabla 15: Perfil S830

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0151$.

- Perfil NREL-S831

Re	Cl máx	Cd	α
3000000	1,770	0,03	10,5
3200000	1,771	0,03	10,5
3400000	1,772	0,03	10,5
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,77	0,026	

Tabla 16: Perfil S831

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0147$.

- Perfil NREL-S832

Re	Cl máx	Cd	α
2000000	1,913	0,030	11,5
2200000	1,919	0,030	11,5
2400000	1,924	0,029	11,5
	PROMEDIO	PROMEDIO	
	1,92	0,030	

Tabla 17: Perfil S832

Se obtuvo un $\varepsilon = 0,0155$.

Hay que señalar que los valores de C_L promedio son los que se han empleado para calcular la distribución de cuerda de las diferentes palas.

5.2 Diseño 1

El primer diseño comprende a los perfiles S818, S816 y S817.

Conocidos los valores de las cuerdas para cada tramo y los coeficientes de sustentación para los diferentes números de Reynolds, se calculan en una tabla los diferenciales de coeficientes y fuerzas de cada tramo, para posteriormente trazar una gráfica cuya función se integrará.

x	c	α	θ	Re	Cl	Cd	Ct	Cn		Fn	M
0	0	0	0	0	0	0	0	0	Buje	0	0
1,25	0	0	48,87	0	0	0	0	0		0	0
2,5	2,431	12,5	26,86	1,78E+06	1,942	0,0293	1,209	1,520	S818	779,47	1549,69
3,75	2,519	12,5	19,51	2,17E+06	1,942	0,029	1,005	1,662		1224,69	2775,31
5	2,226	12,5	14,04	2,25E+06	1,965	0,030	0,851	1,771		1594,04	3829,85
6,25	1,979	12,5	9,96	2,33E+06	1,965	0,030	0,723	1,827		1978,05	4891,85
7,5	1,775	12,5	6,87	2,40E+06	1,965	0,030	0,624	1,864		2383,45	5980,49
8,75	1,608	12,5	4,48	2,46E+06	1,965	0,030	0,545	1,888		2810,16	7098,98
10	1,475	12,5	2,58	2,53E+06	1,965	0,030	0,482	1,905		3264,69	8265,89
11,25	1,371	12,5	1,05	2,61E+06	1,965	0,030	0,431	1,917		3758,26	9510,46
12,5	1,292	12,5	-0,21	2,71E+06	1,965	0,030	0,389	1,926		4304,35	10866,67
13,75	1,235	12,5	-1,26	2,82E+06	1,985	0,028	0,359	1,952		4965,35	12565,26
15	1,194	12,0	-1,65	2,96E+06	1,447	0,027	0,234	1,428	S816	4129,84	10135,34
16,25	1,166	12,0	-2,41	3,12E+06	1,450	0,026	0,216	1,434		4706,93	11495,18
17,5	1,146	12,0	-3,07	3,29E+06	1,450	0,026	0,199	1,437		5334,43	12933,20
18,75	1,130	12,0	-3,65	3,46E+06	1,453	0,026	0,185	1,441		6023,38	14523,42
20	1,115	12,0	-4,15	3,63E+06	1,456	0,026	0,173	1,446		6745,43	16171,62
21,25	1,095	12,0	-4,60	3,78E+06	1,459	0,025	0,163	1,450		7469,97	17806,33
22,5	1,067	10,5	-3,51	3,90E+06	1,376	0,016	0,152	1,368	S817	7667,83	19137,84
23,75	1,026	10,5	-3,87	3,95E+06	1,376	0,016	0,143	1,369		8197,43	20356,88
25	0,968	10,5	-4,19	3,92E+06	1,377	0,016	0,136	1,370		8561,98	21168,44

Tabla 18: Cálculos diseño 1

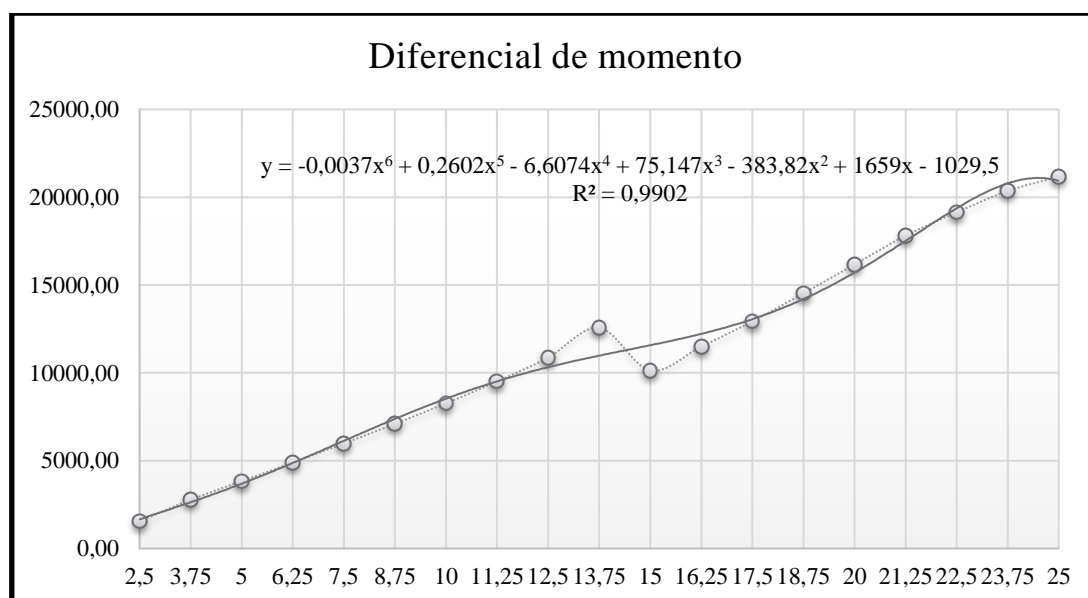


Ilustración 5: Función diferencial de momento diseño 1

Se ha descartado esta opción de diseño por presentar cambios bruscos de momento a lo largo de la pala, lo cual puede comprometer demasiado a la integridad estructural.

5.3 Diseño 2

El segundo diseño comprende a los perfiles S818, S827 y S828.

x	c	α	θ	Re	Cl	Cd	Ct	Cn		Fn	M
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
1,25	0	0	48,87	0	0	0	0	0		0	0
2,5	2,43	12,5	26,86	1,78E+06	1,942	0,029	1,209	1,520	S818	779,47	1549,69
3,75	2,53	12,5	19,51	2,18E+06	1,942	0,029	1,005	1,662		1230,72	2788,97
5	2,22	12,5	14,04	2,25E+06	1,965	0,030	0,851	1,771		1593,04	3827,44
6,25	1,97	12,5	9,96	2,32E+06	1,965	0,030	0,723	1,827		1968,85	4869,11
7,5	1,76	12,5	6,87	2,38E+06	1,965	0,030	0,624	1,864		2367,87	5941,40
8,75	1,60	12,5	4,48	2,45E+06	1,965	0,030	0,545	1,888		2794,08	7058,36
10	1,47	12,5	2,58	2,53E+06	1,965	0,030	0,482	1,905		3258,94	8251,31
11,25	1,38	12,5	1,05	2,63E+06	1,965	0,030	0,431	1,917		3779,09	9563,18
12,5	1,31	13,0	-0,71	2,75E+06	1,985	0,028	0,395	1,945		4417,12	11212,57
13,75	1,27	13,0	-1,76	2,91E+06	1,985	0,028	0,359	1,952		5111,72	12935,67
15	1,25	11,00	-0,65	3,09E+06	1,344	0,023	0,219	1,326	S827	4007,70	9921,39
16,25	1,24	11,00	-1,41	3,31E+06	1,346	0,023	0,202	1,331		4639,65	11432,85
17,5	1,24	11,00	-2,07	3,55E+06	1,348	0,022	0,187	1,335		5354,28	13127,06
18,75	1,24	11,00	-2,65	3,80E+06	1,349	0,022	0,174	1,338		6139,11	14969,82
20	1,24	11,00	-3,15	4,06E+06	1,351	0,022	0,163	1,341		6984,19	16935,80
21,25	1,24	11,00	-3,60	4,29E+06	1,352	0,022	0,152	1,344		7848,86	18923,19
22,5	1,23	11,00	-4,01	4,49E+06	1,239	0,019	0,132	1,232	S828	7958,87	19228,30
23,75	1,20	11,00	-4,37	4,63E+06	1,239	0,019	0,125	1,233		8648,02	20760,82
25	1,15	11,00	-4,69	4,67E+06	1,240	0,019	0,118	1,235		9192,91	21929,81

Tabla 19: Cálculos diseño 2

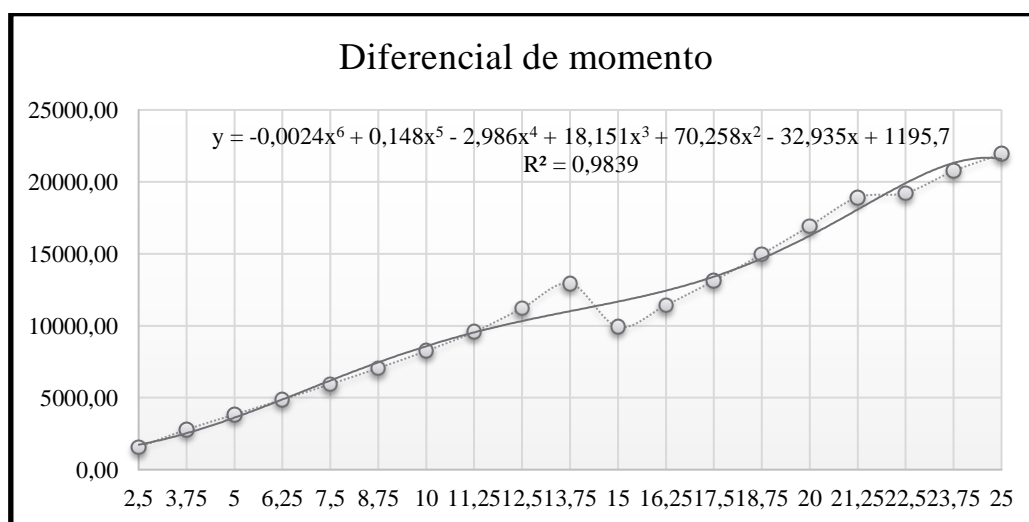


Ilustración 6: Función diferencial de momento diseño 2

La segunda opción también se ha descartado puesto que presenta de nuevo cambios bruscos.

5.4 Diseño 3

El tercer diseño comprende a los perfiles S818, S830 y S831.

x	c	α	θ	Re	Cl	Cd	Ct	Cn		Fn	M
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
1,25	0	0	48,87	0	0	0	0	0		0	0
2,5	2,43	12,5	26,86	1,78E+06	1,942	0,029	1,209	1,520	S818	779,5	1.549,7
3,75	2,47	12,5	19,51	2,13E+06	1,942	0,029	1,005	1,662		1.202,8	2.725,7
5	2,23	12,5	14,04	2,26E+06	1,965	0,030	0,851	1,771		1.597,9	3.839,1
6,25	2,01	12,5	9,96	2,37E+06	1,965	0,030	0,723	1,827		2.011,8	4.975,4
7,5	1,82	12,5	6,87	2,46E+06	1,965	0,030	0,624	1,864		2.441,5	6.126,1
8,75	1,64	12,5	4,48	2,52E+06	1,965	0,030	0,545	1,888		2.874,1	7.260,6
10	1,49	12,5	2,58	2,56E+06	1,965	0,030	0,482	1,905		3.302,3	8.361,2
11,25	1,36	12,5	1,05	2,59E+06	1,965	0,030	0,431	1,917		3.723,7	9.423,1
12,5	1,24	12,5	-0,21	2,60E+06	1,965	0,030	0,389	1,926		4.140,5	10.453,0
13,75	1,15	12,5	-1,26	2,62E+06	1,965	0,030	0,354	1,933		4.558,8	11.467,5
15	1,06	11,5	-1,15	2,63E+06	1,928	0,029	0,318	1,902	S830	4.893,9	12.281,0
16,25	0,99	11,5	-1,91	2,66E+06	1,928	0,029	0,293	1,906		5.337,6	13.327,8
17,5	0,94	11,5	-2,57	2,70E+06	1,928	0,029	0,271	1,909		5.817,4	14.446,2
18,75	0,90	11,5	-3,15	2,75E+06	1,930	0,028	0,252	1,914		6.354,3	15.712,5
20	0,87	11,5	-3,65	2,83E+06	1,930	0,028	0,235	1,916		6.951,1	17.083,8
21,25	0,85	11,5	-4,10	2,92E+06	1,933	0,029	0,220	1,921		7.640,6	18.566,4
22,5	0,83	10,5	-3,51	3,04E+06	1,770	0,026	0,190	1,760	S831	7.702,9	18.664,7
23,75	0,83	10,5	-3,87	3,18E+06	1,771	0,026	0,179	1,762		8.511,4	20.503,6
25	0,83	10,5	-4,19	3,35E+06	1,772	0,026	0,169	1,764		9.426,1	22.575,0

Tabla 20: Cálculos diseño 3

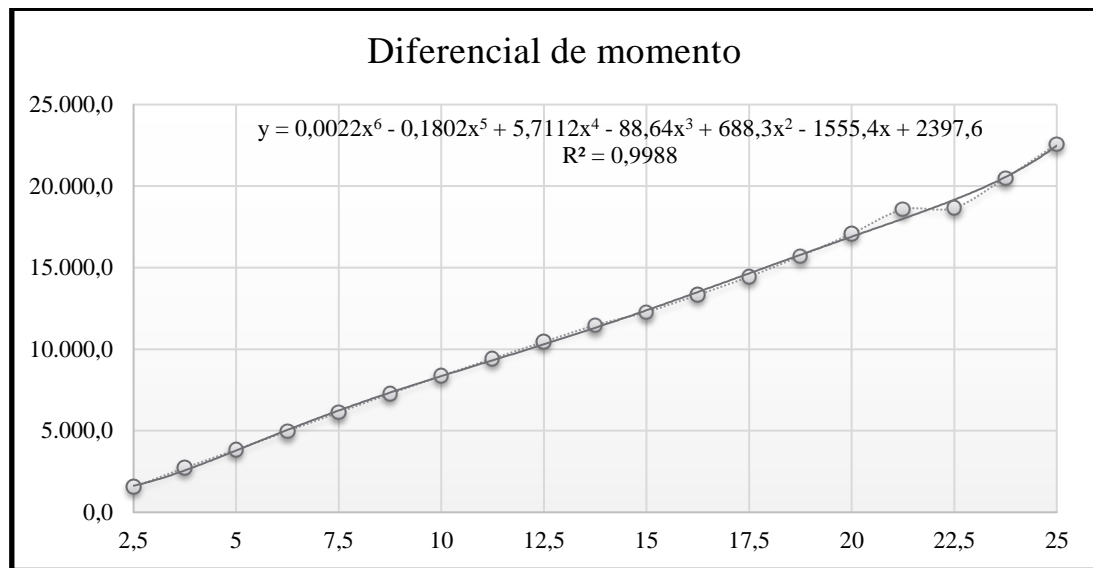


Ilustración 7: Función diferencial de momento diseño 3

Esta función presenta un comportamiento muy homogéneo y al integrar la función se obtiene un momento resultante de 217.952,7 Nm, lo cual multiplicado por la velocidad angular resulta en una potencia de 523,09 kW.

5.5 Diseño 4

El cuarto diseño comprende a los perfiles S818, S830 y S832.

x	c	α	θ	Re	Cl	Cd	Ct	Cn		Fn	M
0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0,000
1,25	0	0	48,87	0	0	0	0	0		0	0,000
2,5	2,431	12,5	26,86	1,78E+06	1,942	0,029	1,209	1,520	S818	779,5	1549,7
3,75	2,477	12,5	19,51	2,13E+06	1,942	0,030	1,004	1,663		1204,4	2727,3
5	2,231	12,5	14,04	2,26E+06	1,965	0,028	0,853	1,771		1596,7	3845,2
6,25	2,010	12,5	9,96	2,37E+06	1,965	0,028	0,725	1,827		2008,2	4979,7
7,5	1,814	12,5	6,87	2,45E+06	1,965	0,028	0,625	1,863		2434,6	6127,6
8,75	1,639	12,5	4,48	2,51E+06	1,965	0,028	0,547	1,888		2862,7	7256,6
10	1,484	12,5	2,58	2,55E+06	1,965	0,028	0,484	1,905		3283,1	8344,8
11,25	1,347	12,5	1,05	2,57E+06	1,965	0,028	0,433	1,917		3690,8	9380,0
12,5	1,226	12,5	-0,21	2,57E+06	1,965	0,028	0,391	1,926		4083,4	10357,8
13,75	1,121	12,5	-1,26	2,56E+06	1,965	0,028	0,355	1,933		4460,5	11278,5
15	1,028	11,5	-1,15	2,55E+06	1,928	0,029	0,318	1,902	S830	4732,2	11875,3
16,25	0,946	11,5	-1,91	2,53E+06	1,928	0,029	0,293	1,906		5073,1	12667,3
17,5	0,873	11,5	-2,57	2,50E+06	1,928	0,029	0,271	1,909		5398,6	13406,2
18,75	0,807	11,5	-3,15	2,47E+06	1,924	0,029	0,251	1,908		5693,9	14025,9
20	0,748	11,5	-3,65	2,44E+06	1,924	0,029	0,234	1,910		5974,8	14624,6
21,25	0,692	11,5	-4,10	2,39E+06	1,924	0,029	0,219	1,912		6219,0	15122,0
22,5	0,638	11,5	-4,51	2,33E+06	1,924	0,029	0,205	1,913	S832	6409,8	15479,7
23,75	0,584	11,5	-4,87	2,25E+06	1,919	0,030	0,192	1,910		6506,9	15556,4
25	0,528	11,5	-5,19	2,14E+06	1,919	0,030	0,181	1,911		6512,2	15454,8

Tabla 21: Cálculos diseño 4

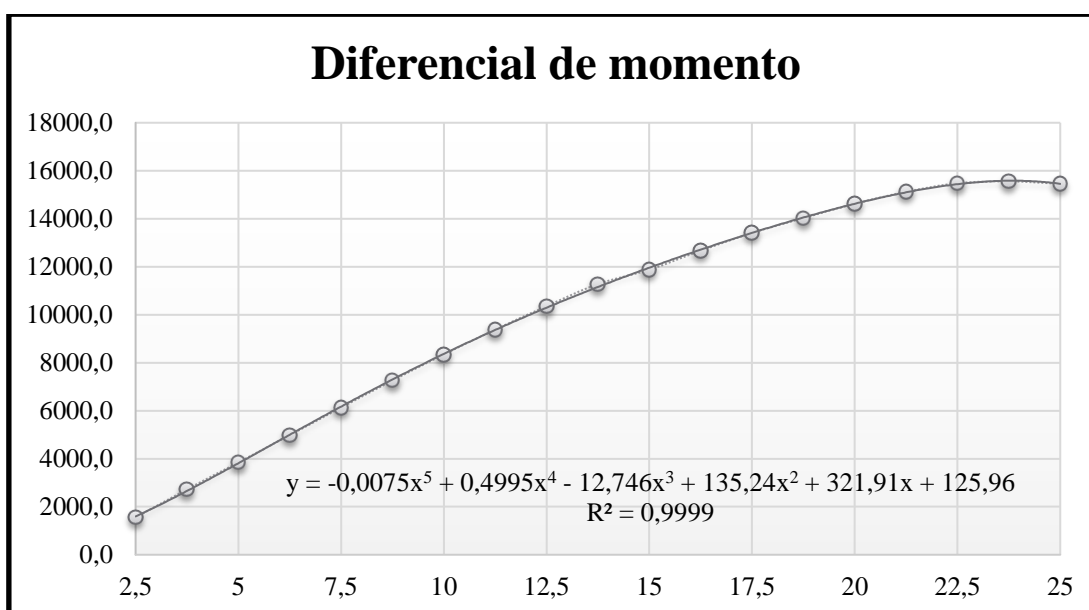


Ilustración 8: Función diferencial de momento diseño 3



ANEXO

Esta función es muy homogénea y su curva de ajuste es muy fiable, pero presenta un par motor de 186.923,3 Nm, que se traduce en una potencia de 448,62 kW, lo cual no es suficiente.

6 DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR

Una vez elegida la opción más adecuada, se ha realizado un diseño de la geometría mediante el software PTC Creo 3.0.

6.1 Pala

Para el diseño 3D de la pala se ha dividido la geometría en 20 planos que distan entre sí 1,25 metros, en los cuales se han esbozado las geometrías correspondientes a cada perfil, con su ángulo de paso y su cuerda. En las primeras secciones, para hacer la transición más suave entre el acoplamiento al buje, de sección circular y el primer perfil, se han esbozado una serie de elipses.

A la hora de esbozar se han importado las geometrías en DXF, cada una con su correspondiente giro.

Tras tener todas las geometrías esbozadas en sus planos se ha realizado una “*Mezcla Barrida*” que las convierta en un sólido.

Para la punta de pala se han creado dos superficies tangentes a borde de salida de la pala, tanto por el intradós como por el extradós, para luego crear un sólido con la unión de ambas.

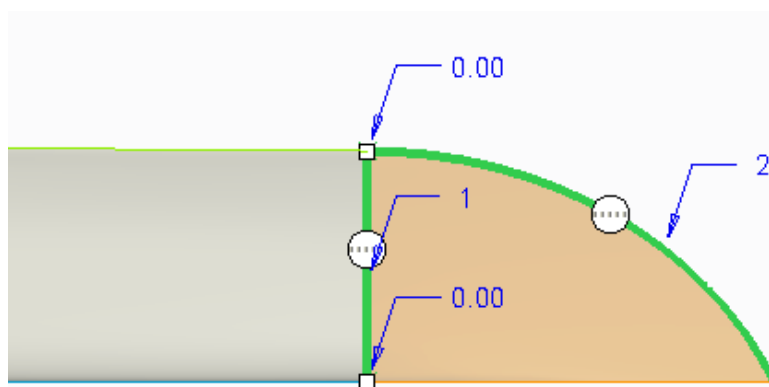


Ilustración 9: Superficie de la punta

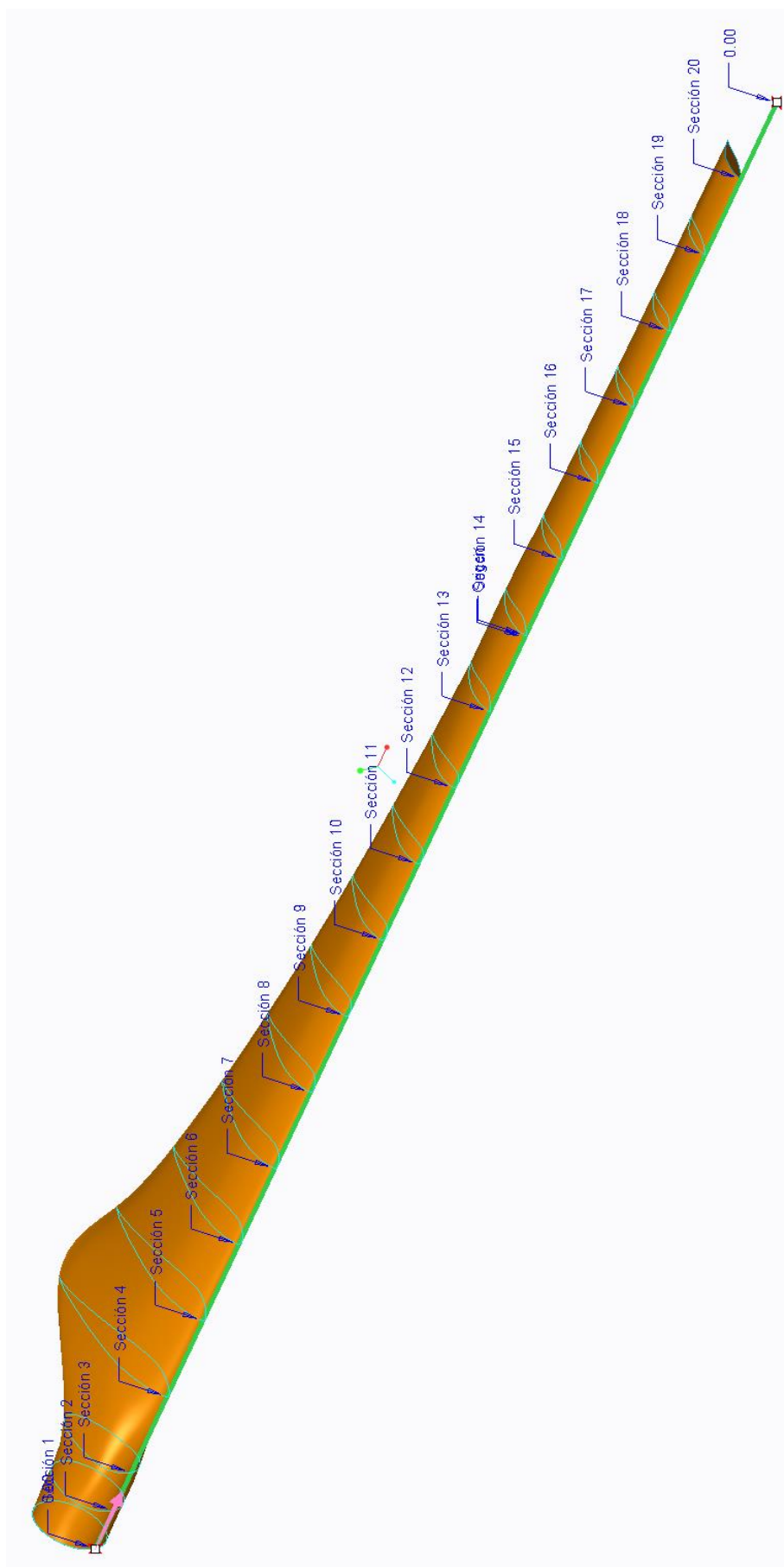


Ilustración 10: Mezcla barrida

6.2 Buje

En cuanto al buje, su diseño es más simple, consta de una superficie de revolución definida por un arco a la cual se le han practicado 3 agujeros dispuestos a 120° alrededor del eje de giro, en donde posteriormente se alojarán las palas.

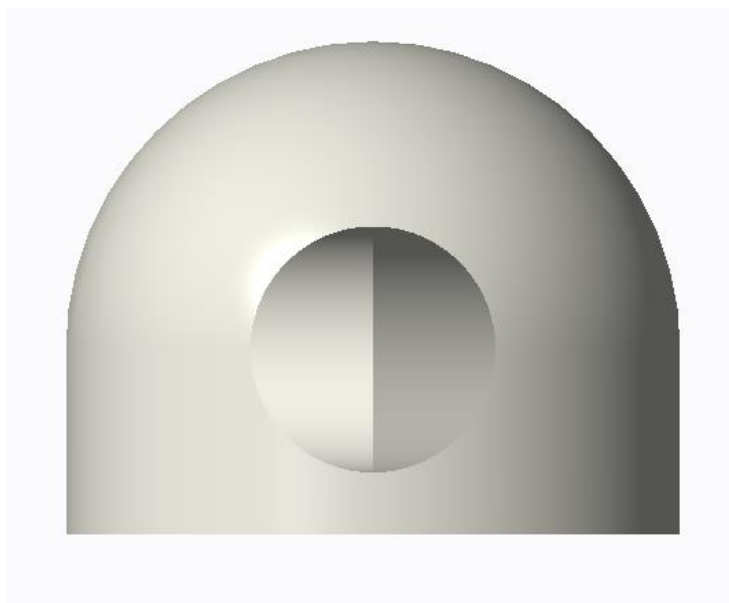


Ilustración 11: Buje 1

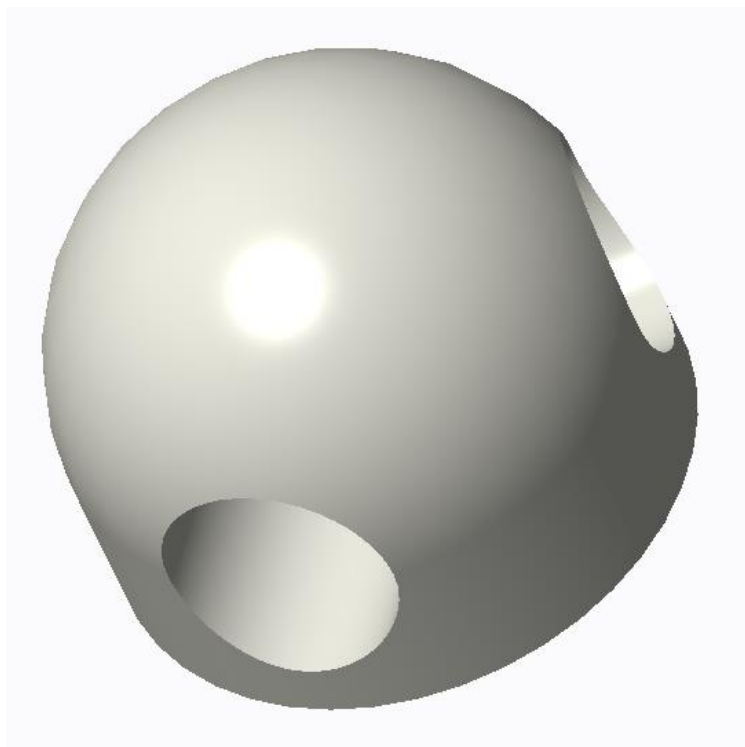


Ilustración 12: Buje 2

6.3 Rotor

El rotor consiste en el ensamblaje de tres palas con el buje.

Las palas se colocaron con un ángulo de calado de 28,86, y a partir de ahí cada perfil toma su posición, ya que a la hora de diseñar la pala se colocaron con su correspondiente ángulo relativo con respecto a la primera sección.

x (m)	Cuerda (c)	θ relativo	
1,25	2,431	0,00	S818
2,5	2,474	-7,35	
3,75	2,231	-12,82	
5	2,013	-16,90	
6,25	1,818	-19,99	
7,5	1,645	-22,38	
8,75	1,492	-24,28	
10	1,358	-25,81	
11,25	1,243	-27,07	
12,5	1,145	-28,12	
13,75	1,063	-28,01	S830
15	0,995	-28,77	
16,25	0,940	-29,43	
17,5	0,898	-30,00	
18,75	0,867	-30,51	
20	0,846	-30,96	
21,25	0,833	-30,36	S831
22,5	0,827	-30,72	
23,75	0,828	-31,05	

Tabla 22: Posiciones relativas y cuerdas de cada perfil



Ilustración 13: Rotor

No se han dibujado los planos de fabricación de ninguno de los elementos, debido a que el diseño 3D solo responde a la necesidad de crear una geometría, para posteriormente simular su comportamiento en un programa de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE).

7 SIMULACIÓN

Tras diseñar la geometría del conjunto del rotor, se ha exportado en formato STEP (.stp), un formato standard de ficheros CAD regulado por la norma ISO 10303.

El software empleado para la simulación del modelo es ANSYS en su versión 18.

Se ha importado la geometría en la aplicación *Design Modeler*, que es una de las herramientas de ANSYS Workbench para crear geometrías.

Tras importar la geometría se ha creado un cilindro, el cual envuelve al rotor; el objetivo de ello es crear un cuerpo rotatorio, restándole al cilindro la geometría importada.

Es importante destacar que el material de trabajo será el aire por lo que las zonas sustraídas serán el sólido.

A continuación se crea un volumen de control, que englobe al sistema. Un cilindro de 100 m de diámetro y 60 m de longitud.

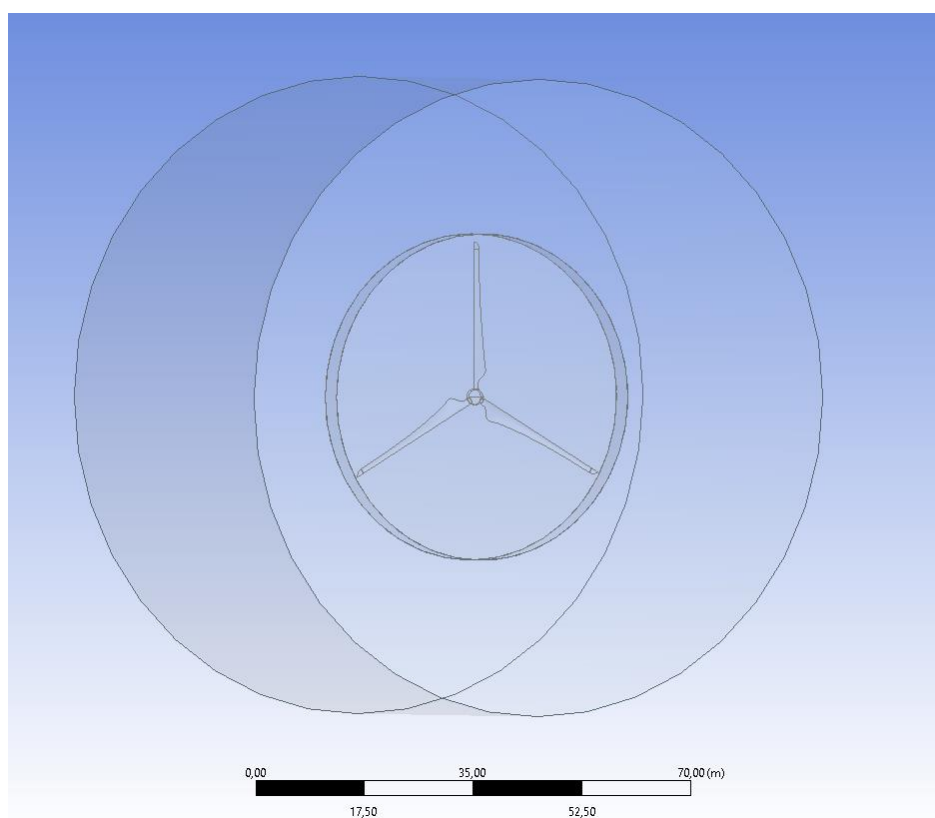


Ilustración 14: Geometría analizada

7.1 Mallado

Para mallar la geometría se utilizó una función de curvatura, con el fin de que en las secciones planas y continuas se aplicara un elemento mayor, y en las secciones curvadas y complejas un mallado más fino.

Se estableció un criterio de malla fina y ANSYS automáticamente calculó el resto de parámetros.

Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (2,3132e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (2,31320 m)
<input type="checkbox"/> Max Tet Size	Default (4,62650 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Automatic Mesh ...	On
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (1,1566e-002 m)
Minimum Edge L...	5,3864e-004 m

Tabla 23: Parámetros de mallado

Se obtuvo una malla de 470.034 nodos y 2.629.977 elementos.

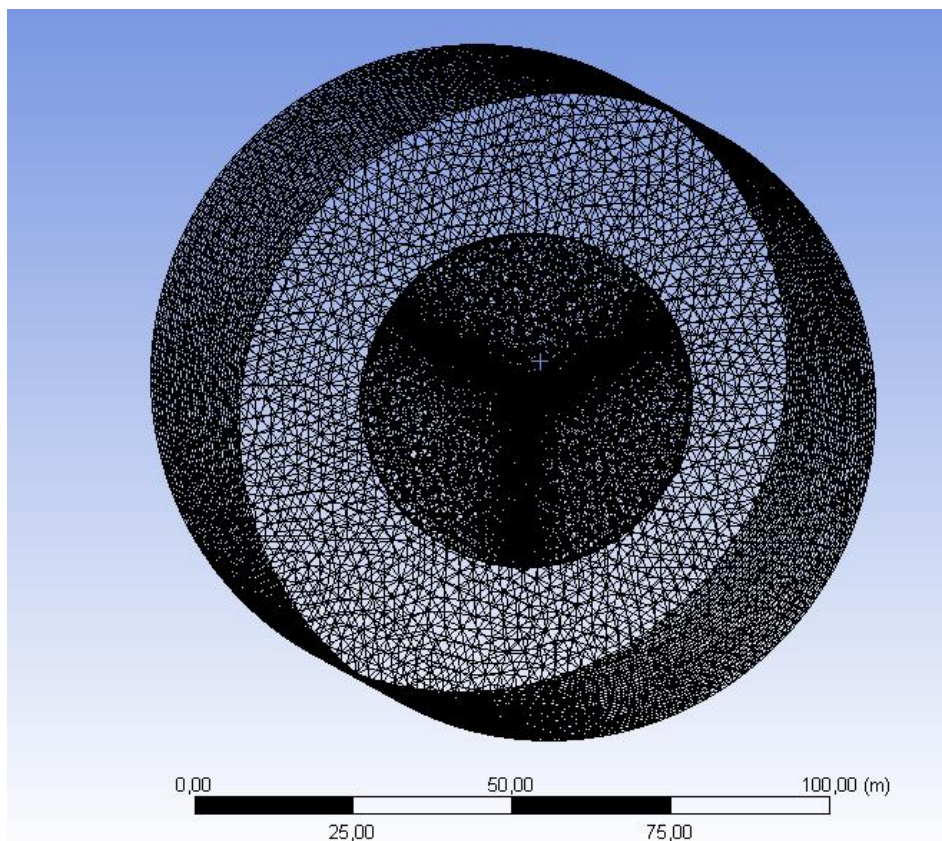


Ilustración 15: Malla del rotor

Tras el mallado, se han definido las secciones de entrada y de salida, como “inlet” y “outlet” respectivamente, para que en el siguiente paso FLUENT las reconozca como tales.

7.2 Preprocesado

La malla es compatible con el módulo de simulación de dinámica de fluidos FLUENT, herramienta con la que se realizó el preprocesado y el cálculo.

Se trata de una simulación transitoria, en la que se ha utilizado el modelo de cálculo *k-epsilon*, que es un modelo muy usado en CFD para simular flujos con posibles regímenes turbulentos. Es un modelo de dos ecuaciones, la primera variable es la energía cinética y la segunda es la energía de la corriente turbulenta.

El material presente en la malla se ha definido como aire cuya densidad es de $1,166 \text{ kg/m}^3$.

Se ha llamado “rotating body” al cilindro interior, para poder establecer un movimiento giratorio de la malla del mismo.

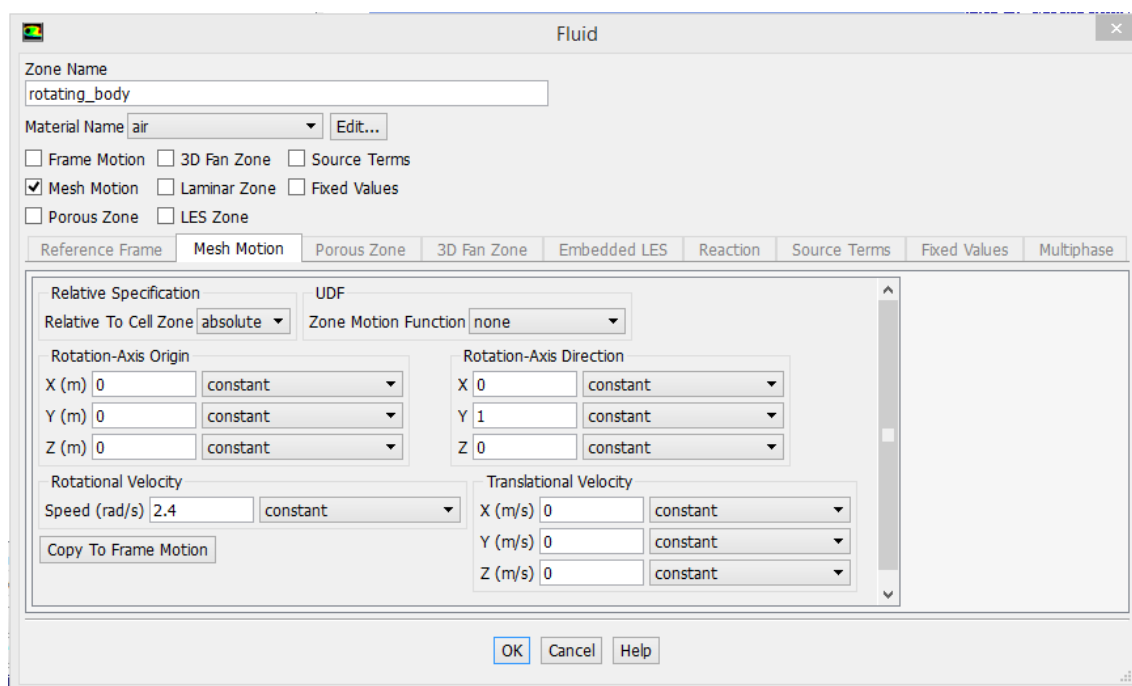


Ilustración 16: Datos del cuerpo giratorio

En cuanto a las condiciones de contorno de los distintos elementos, automáticamente se han establecido la sección de entrada como entrada de velocidad y la sección de salida como salida de presión.

En la entrada de velocidad ésta se ha fijado como 10 m/s , que es la velocidad a la cual se alcanza el régimen nominal.

Previamente al cálculo se ha especificado que cada *timestep* generado se guarde en un fichero de datos compatible con la herramienta de postprocesado CFD-Post.

7.3 Cálculo

A la hora de calcular se han generado 10 *timesteps*, que son soluciones estacionarias dentro de un problema transitorio.

Cada *timestep* se genera cada 0,2618 s que multiplicado por 10 resulta en 2,618 s que es lo que tarda el rotor en dar una vuelta completa.

Para cada solución se realizarán 15 iteraciones de cálculo.

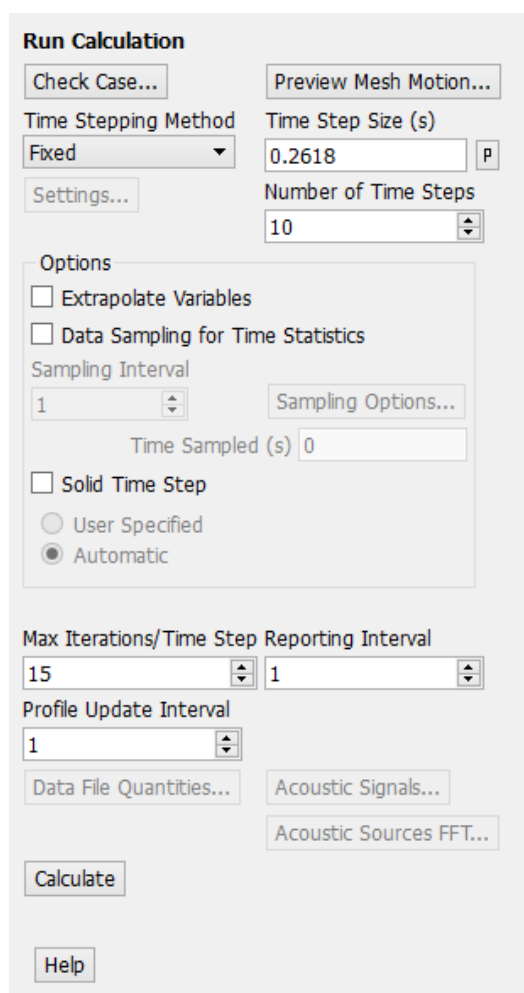


Ilustración 17: Parámetros de cálculo



7.4 Postprocesado

Una vez calculado el modelo, se han obtenido los 10 *timesteps*, de los cuales, se puede obtener información.

A la hora de obtener datos estacionarios, se ha utilizado el último, sin embargo para visualizar una simulación se ha creado un pequeño vídeo utilizando los 10 *timesteps* generados.

Los resultados del post procesado ya han sido mostrados en la memoria.



8 ACTUACIÓN DE LA TURBINA

En la hoja Excel llamada “*Cálculos*” en la hoja “*Curva de Potencia*” se detallan las condiciones de funcionamiento y las potencias generadas desde el arranque de la turbina hasta llegar a la potencia nominal.

Para calcularlas se ha tenido que volver a recurrir al software *JavaFoil* y obtener los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre para todo el rango de funcionamiento.

Al igual que se ha realizado a la hora de diseñar la turbina, calculando todos los parámetros en condiciones óptimas, para el resto de velocidades se ha hecho lo mismo, y una vez se han obtenido las 7 gráficas de momento (intervalos de 1 m/s) se integran y se multiplica el valor obtenido por su velocidad angular correspondiente.

$v(m/s)$	$\omega (rad/s)$
3	0,72
4	0,96
5	1,2
6	1,44
7	1,68
8	1,92
9	2,16

Tabla 24: Velocidades angulares